

10/567645

1 WO20090015676 PCT/JP 09 FEB 2006

## 明細書

### 電気機械フィルタ、これを用いた電気回路および電気機器

#### 5 技術分野

本発明は、微小な振動子を備える電気機械フィルタ、これを用いた電気回路および電気機器に関する。

#### 背景技術

10 無線端末などの端末の小型化が進む中、端末の筐体内に内蔵されるフィルタなどの受動部品の小型化が望まれている。近年、特に、無線通信でよく用いられているL Cなどによる電気的共振を利用したフィルタは、共振器サイズが電気長に依存するため、フィルタの小型化が難しいという問題があり、新たな信号選択の原理が模索されている。

15 その中で、次世代フィルタの候補として、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、NEMS (Nano Electoro Mechanical Systems) 技術により微小な電気機械フィルタが作製されている。

この電気機械フィルタは、メカニカルな共振を利用し、その構成においては共振する振動子の質量とバネ定数に依存するため、電気的共振を用いたフィルタよりもサイズを減少することができる。例えば、1 GHz帯で共振する共振子のサイズは、形状、共振モードに依るが、数ミクロン以下の大きさとなる。また、このようにフィルタのサイズが数ミクロン以下の大きさとなることから、微小な振動子の製造方法および微小な振動を検出する方法も必要となる。

25 従来の微小振動子を用いた電気機械フィルタとして、例えば、特開平6-310976号公報に示すように、微小な振動子にカーボンナノチューブを用いたものがある。カーボンナノチューブは、炭素原子が網目の形で結びつ

いて形成されたナノメートルサイズの非常に小さい筒状の物質である。

この特開平6-310976号公報における電気機械フィルタの信号選択の仕組みは、カーボンナノチューブやフラーレンが圧電材料であると仮定した場合を前提としている。詳細には、この従来の電気機械フィルタでは、所定長のカーボンナノチューブの両端部分にそれぞれ、入力信号ポートが接続された電極、出力信号ポートが接続された電極が2つずつ設けられ、これら電極が、カーボンナノチューブに信号を印加する入力端子、出力端子を形成している。

そして、この電気機械フィルタでは、入力信号ポートより入力した信号により、カーボンナノチューブが圧電効果によりその自己共振周波数で振動し、圧電効果により出力信号ポートへ出力が電圧として取り出されるものとなっている。また、このような従来の微小な振動体の振動検出方法として、マグネットモーティブ、レーザードップラー干渉法などの方法が検討されている。

しかしながら、現在のところ、特許文献1にみられるカーボンナノチューブやフラーレンについては、強誘電性絶縁体に見られる圧電効果の発現の報告はなく、むしろ非常に優れた導電性をもつことが報告されている。したがって、上記カーボンナノチューブやフラーレンの物性の仮定による特許文献1の技術は、その実現が難しいという問題がある。

また、この電気機械フィルタにおいて、微小構造物である振動子の振動を検出方法として、マグネットモーティブの手法を用いた場合では、大きな外部磁場を発生させる装置が必要となり、マイクロコイル作製プロセスや、スペースの確保などの問題がある。また、レーザードップラー干渉法を用いて従来の振動子の振動検出を行う場合には、対象となる振動子に焦点を当て、且つ十分な反射光を得るのは困難である。さらに、別の振動検出の方法として、微小な振動子の先端に、レーザー反射用の金属やシリコン(Si)製のミラーを付け、構造物の振動を検出する方法も検討されているが、その方法では、ミラーも含めた構造物の振動を検出することとなり、微小な振動子自体の振

動特性を検出するのは困難である。

### 発明の開示

本発明の目的は、導電性に優れたカーボンナノチューブなどの微小の振動子を用いることで全体を微小にすることができるとともに、所定の周波数の信号を選択することができる電気機械フィルタ、これを用いた電気回路および電気機器を提供することである。

本発明の一形態によれば、電気機械フィルタは、信号が入力されることにより物理変化する第1部材と、前記第1部材から所定間隔空けて配置され、  
前記第1部材に所定の周波数の信号が入力されたときに、前記第1部材の物理変化を検出する第2部材とを有する構成を採る。

### 図面の簡単な説明

図1は、本発明に係る実施の形態1における多殻構造を用いた電気機械フィルタの構成を示す斜視図、

図2は、本発明に係る実施の形態1における多層カーボンナノチューブを用いた電気機械フィルタの構成を示す縦断面図、

図3は、本発明の実施の形態1における変形例である電気機械フィルタの縦断面図、

図4は、本発明の実施の形態1における変形例である電気機械フィルタの横断面図、

図5は、本発明の実施の形態1における変形例である電気機械フィルタの横断面図、

図6Aは、本発明に係る実施の形態1における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

図6Bは、本発明に係る実施の形態1における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

図 6 C は、本発明に係る実施の形態 1 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

図 6 D は、本発明に係る実施の形態 1 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

5 図 7 A は、本発明に係る実施の形態 1 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

図 7 B は、本発明に係る実施の形態 1 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図、

10 図 8 は、本発明に係る電気機械フィルタを用いたフィルタバンク回路のブロック図、

図 9 は、本発明に係る実施の形態 2 における多殻構造を用いた電気機械フィルタの構成を示す斜視図、

図 10 は、本発明に係る実施の形態 2 における多殻構造を用いた電気機械フィルタの構成を示す縦断面図、

15 図 11 は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの構成を示す斜視図、

図 12 A は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明するための断面図、

20 図 12 B は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明するための断面図、

図 12 C は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明するための断面図、

図 12 D は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明するための断面図、

25 図 12 E は、本発明に係る実施の形態 3 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明するための断面図、

図 13 は、図 11 に示す電気機械フィルタの変形例を示す斜視図、

図14Aは、本発明に係る電気機械フィルタにおける振動子の振動検出方法の一例を説明するための図、

図14Bは、図14Aにおいて、振動子から検出されたトンネル電流を示す図、

5 図15は、本発明に係る実施の形態3における電気機械フィルタにおける振動検出方法の応用例を説明するための斜視図、

図16は、本発明に係る実施の形態4における電気機械フィルタの構成を示す斜視図、

10 図17は、本発明に係る実施の形態4における電気機械フィルタの変形例を示す平断面図、

図18は、本発明の実施の形態5における電気機械フィルタの構成を示す斜視図、

図19は、円筒型の振動子の高さと固有振動数の関係を示す図、  
および

15 図20は、探針の振幅と、振動子の共振周波数との関係を示す図である。

### 発明を実施するための最良の形態

本実施の形態では、携帯電話といった小型化された無線端末などの通信端末の受動部品であるフィルタに用いられる微小な機械振動子（以下「微小振動子」という）として、中心軸に対して対称な構造を有する、つまり、軸対称性を有する部材（詳細には、軸回転対称構造を有する部材）、例えば、炭素の同素体であるカーボンナノチューブやカーボンナノホーン、フラーレンを含む自己組織化により形成される物質を用い、自己共振周波数と同等の所定の周波数の信号が入力されたとき、その信号を選択的に出力する。

特に、自己組織化により形成される前記微小振動子を、当該微小な機械振動子と同様に、カーボンナノチューブやカーボンナノホーン、フラーレンを

含む自己組織化により形成される物質からなる殻状の部材で、覆うように形成された微小な構造体を用いる。そして、この構造体における微小振動子、あるいは殻状の部材の一方（ここでは振動子）に自己共振周波数と同等の所定の周波数の信号を入力することで、前記一方が、微小振動子と殻状の部材との間のギャップで生じる静電気力により大きく励振され、静電容量の変化により他方（ここでは殻状の部材）に、前記所定の周波数の信号を出力する。  
 5 例えれば、以下で説明する実施の形態 1 に係る電気機械フィルタでは、前記構造体の微小振動子として直径数ナノメートルのカーボンナノチューブを用いている。

10 機械振動子の自己共振周波数  $f$  は、構造体の長さ  $L$ 、ヤング率  $E$ 、密度  $\rho$  とすると下記の（式 1）と表記される。

$$f \propto \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \cdots \text{（式 1）}$$

上記の（式 1）に示すように、共振周波数  $f$  を高くするには、より高いヤング率  $E$ 、より低い密度  $\rho$  の材料を用いる必要がある。カーボンナノチューブは、1 TPa オーダーの非常に高いヤング率の材料であり、より高い共振周波数を発生する微小振動子として用いるに望ましい材料である。  
 15

さらに、カーボンナノチューブは、カーボンシートを巻いて筒状にした構造をなし、表面部分で 3 次元的な立体的構造が形成されている。このため、カーボンナノチューブにおける密度の定義には注意する必要があるが、元素自体が非常に軽い材料である上、振動子を形成する原子数密度も他の材料と比較して低いため、密度  $\rho$  が低くなっている。多層（マルチウォール）カーボンナノチューブではなく、単層（シングルウォール）カーボンナノチューブを用いれば、更に密度を下げられるため、より高い共振周波数の発生が期待できる。  
 20

25 カーボンナノチューブのようなナノ構造体を機械振動子として用いる場合、その微小な振動を検知するには、ナノ構造体とナノ構造体に信号を入力する

電極部などの振動検知手段の間に、ナノメートルオーダーより小さい微小ギャップを形成する必要がある。しかし、この微小なギャップの形成は、現在可能とされているリソグラフィー技術などを用いた人工的な微細加工技術では、非常に困難である。そこで、以下に説明する本発明に係る各実施の形態  
5 では、人工的ではなく、原子、分子の自己組織化を利用した振動子としての微小構造体およびその周囲に配置する振動検知手段の製造方法を提示し、自己組織化を有する振動子を有するナノメカニクスによる高周波フィルタを提示する。

以下、本発明の実施の形態について、添付図面を参照して詳細に説明する。  
10 (実施の形態 1)

図 1 は、本実施の形態 1 における電気機械フィルタの構成を示す斜視図であり、図 2 は、本実施の形態 1 における電気機械フィルタの構成を示す断面図である。図 2 は、図 1 における A-A' 断面を示している。いずれもカーボンナノチューブを用いた電気機械フィルタの構成を示す図である。

15 図 1 および図 2 に示す電気機械フィルタ 100 では、表面に絶縁膜 102 が形成された基板 104 上に、それぞれ自己組織化により形成されたカーボンナノチューブである内殻 106 および内殻 106 を覆う外殻 108 と、内殻 106 に信号を入力する信号入力側電極部 110 と、外殻 108 から信号を外部に出力する信号出力側電極部 112 と、スペーサ部 114 とが設けられている。  
20

基板 104 は、シリコンなどにより形成され、絶縁膜 102 は、酸化シリコンなどの絶縁体により形成されている。

絶縁膜 102 上には、その中央部分に信号入力側電極部 110 が設けられるとともに、この信号入力側電極部 110 の周囲にスペーサ部 114 を介して、信号出力側電極部 112 が設けられている。  
25

信号入力側電極部 110 には、当該信号入力側電極部 110 に信号を入力する入力信号ポートが接続され、信号出力側電極部 112 には、出力信号ボ

ートが接続されている。この信号出力側電極部 112 は、スペーサ部 114 を介して基板 104 上の絶縁膜 102 に設けられていることにより、信号入力側電極部 110 との結合が避けられた状態となっている。

また、信号入力側電極部 110 および信号出力側電極部 112 は、F e (鉄)、  
5 C o (コバルト)、N i (ニッケル) などのように、自己組織化するカーボンナノチューブの成長の触媒材料により形成されている。

信号入力側電極部 110 の上面には、基端部が接続された内殻 106 が立った状態で設けられ、信号出力側電極部 112 の上面には、基端部が接続された外殻 108 が立った状態で設けられている。

10 内殻 106 および外殻 108 は、それぞれ筒状の本体部の先端部に、当該先端部を塞ぐようにキャップ部が設けられ、内殻 106 は外殻 108 に内包された状態で配置されている。これら内殻 106 及び外殻 108 は、それぞれ、中心軸に対して対称な構造を有している。なお、中心軸は、ここでは、基板 104 に対して垂直な軸としている。

15 そして、内殻 106 の外面と外殻 108 の内面との間には所定間隔(以下、ギャップという) G が設けられ、内殻 106 は所定の周波数の信号が入力されることで振動する振動子、外殻 108 は振動検知用の電極となっている。

内殻 106 の振動子と外殻 108 の信号検出用の電極との間のギャップ G は、多層カーボンナノチューブの各層の間隔と同程度のサイズであり、カーボンの自己組織化を利用した微小ギャップ G である。なお、ギャップ G のサイズは、数オングストロームから数十 nm 程度である。このように内殻 106 を外殻 108 が覆うような殻構造であるので、外殻 108 が内殻 106 に被さっている分、これら内殻 106 および外殻 108 が占有するスペースを小さくすることができ、電気機械フィルタ全体のスケールを更に微小にする  
20 25 ことができる。

次に、この電気機械フィルタ 100 における信号伝播と信号選択の仕組みについて説明する。

入力信号ポートより入力された信号は、内殻 106 に伝搬すると、内殻 106 と外殻 108 との電位差により微小ギャップ G において静電気力が発生する。この発生する静電気力により、内殻 106 は励振される。入力信号ポートからは様々な周波数の信号が入力されるが、所定の周波数の信号、つまり、内殻 106 の共振周波数と同等の周波数の信号が、内殻 106 を大きく励振させる。<sup>5</sup> なお、図 2 では振動方向を矢印 V 1 で示している。

このように内殻 106 が大きく励振した場合、内殻 106 と外殻 108 との間のギャップ G が狭くなり、静電容量の増加とインピーダンスの減少が生ずる。すると、信号は、インピーダンスの減少により選択的に外殻 108 に<sup>10</sup> 伝搬し、この外殻 108 および信号出力側電極部 112 を介して、出力信号ポートへ伝播する。これは、材料の自己組織化により形成された微小ギャップ G によって、内殻 106 の微小振動を検出したことと等価である。

一方、内殻 106 の共振周波数ではない周波数の信号は、内殻 106 の大きな振幅の振動を励起することができず、インピーダンスの減少を得ること<sup>15</sup> ができないため、外殻 108 から信号出力側電極部 112、出力信号ポートへ伝播することができない。

このように、電気機械フィルタ 100 によれば、所定の周波数の信号を選択して、出力することができ、それ以外の信号を遮断することができる。

すなわち、本実施の形態 1 によれば、内殻 106 に所定の周波数の信号が<sup>20</sup> 入力されたときに、外殻 108 は内殻 106 の物理変化、すなわち、振動を検出するため、カーボンナノチューブまたはフラーレンなどのように所定の周波数の信号が入力されることで物理変化する微小な部材を内殻 106 に用いることにより、全体を微小にするとともに、外殻 108 により所定の周波数の信号を選択することができる。

<sup>25</sup> 図 3 は、本図 1 及び図 2 の電気機械フィルタの変形例を示す縦断面図である。図 3 に示す電気機械フィルタ 100 a では、電気機械フィルタ 100 において振動検知用の電極である筒状の外殻 108 に代えて、自己組織化によ

り形成され、カーボンナノチューブの一種である一端が閉じた裾広がりの角状のカーボンナノホーンを外殻118として用いている。なお、図3の電気機械フィルタ100aにおいて、図1および図2に示す電気機械フィルタ100と同様の構成については同名称および同符号を付して説明は省略する。

- 5 なお、外殻118は、ここでは、基板104に対して垂直な中心軸に対して対称な構造を有する。

電気機械フィルタ100aは、電気機械フィルタ100と同様に、基板104の表面に形成された絶縁膜102上に、入力信号ポートが接続されている信号入力側電極部110と、スペーサ部114aを介して設けられ、出力信号ポートが接続されている信号出力側電極部112aとが配置されている。

信号入力側電極部110には、その表面に内殻106が接続された状態で設けられ、信号出力側電極部112aには、その表面に、外殻118が接続された状態で設けられている。内殻106は信号入力側電極部112aから立った状態で配置され、外殻118は、軸心を内殻106の軸心と同軸心となるように内殻106を覆うように配置されている。

信号出力側電極部112aに接続される外殻118が、先端部が閉じされ基端部側に向かって裾広がりの略円錐状のカーボンナノホーンであるので、電気機械フィルタ100aでは、電気機械フィルタ100と比べ、外殻118の基端側に向かって、内殻106と外殻118とのギャップG1が広くなっている。このため、外殻118の基端部に接続される信号出力側電極部112aは、絶縁膜102上において、内殻106の基端部に接続される信号入力側電極部110から離れた位置に配置される構成となり、信号入力側電極部110と信号出力側電極部112aの基板104に対するパターニング作業が、容易なものとなっている。

- 25 なお、この電気機械フィルタ100aにおける信号選択の仕組みは、電気機械フィルタ100と同様であるので説明は省略する。

また、内殻106、外殻108、外殻118を構成するカーボンナノチュ

ーブおよびカーボンナノホーンは、多層または単層カーボンナノチューブ、カーボンナノホーンを用いることができる。また、本実施の形態で挙げた内殻 106、外殻 108、外殻 118 は、それぞれ中が空洞の円筒形、円錐形を示したが、これに限らず、円柱形、円錐形、角柱形、角錐形を含む他の形状であっても良い。

図 4 および図 5 は、それぞれ本実施の形態 1 における電気機械フィルタの変形例を示す断面図である。図 4 に示す電気機械フィルタ 100c は、電気機械フィルタ 100 において、内殻 106 を円柱形の内殻 106a とした例である。図 5 に示す電気機械フィルタ 100d は、図 3 に示す変形例としての電気機械フィルタ 100a において、内殻 106 を円柱形の内殻 106a とした例である。内殻 106a は、中心軸に対して対称な構造を有している。なお、内殻 106a の中心軸は、ここでは基板 104 に対して垂直な軸としている。

ここで、電気機械フィルタ 100 の製造方法について説明する。

図 6 A～図 6 D および図 7 A、図 7 B は、本発明の実施の形態 1 における電気機械フィルタの製造工程を段階的に説明する断面図である。

先ず、図 6 A に示すように、シリコン基板 104 上に熱酸化により絶縁膜 102 (図 2 参照) となる酸化シリコン 202 を  $1 \mu\text{m}$  程度の厚さで形成し、更にその上にスペーサ部 114 となる数十 nm 程度の厚さの酸化シリコン 214 をスパッタにより形成する。

次いで、図 6 B に示すように、酸化シリコン 214 を、ドライエッチングにより成形するため、フォトリソグラフィーによりパターンニングしたフォトレジスト 204 を形成する。

そして、酸化シリコン 214 をドライエッチングし、フォトレジスト 204 をアッシングにより除去する。このようにフォトレジスト 204 を除去した後のシリコン基板 104 上の酸化シリコン 214 は、図 6 C に示すように、スペーサ部 114 となる。

次いで、各電極部（ここでは図2に示す信号入力側電極部110および信号出力側電極部112）の形成を行う。

図6Dに示すように、スペーサ部114およびスペーサ部114間の絶縁膜202上に、Fe、Co、Niなどの電極材料205をスパッタにより数5十nm程度堆積し、その上にフォトリソグラフィーにより電極パターンにパターニングされたフォトレジスト206を形成する。

次いで、電極材料205をドライエッチングして、フォトレジスト206をアッシングにより除去し、図7Aに示すように、スペーサ部114上の電極材料205部分を電極部（信号入力側電極部110、信号出力側電極部112）として形成する。

図7Aに示すように、電極材料205の加工によりスペーサ部114上に電極部（信号入力側電極部110、信号出力側電極部112）を形成した後、図7Bに示すように、信号入力側電極部110、信号出力側電極部112上に、基板104に対して垂直方向に電界を発生させながら熱CVD（化学気相成長、Chemical Vapor Deposition）法により内殻106、外殻108となるカーボン構造体（カーボンナノチューブ）を形成し、成長方向制御により内殻106および内殻106を覆う外殻108を有する多殻構造206を作製する。

上記の様な自己組織化により形成される多殻構造206は、CVD法、ス20パッタ法などの材料堆積条件（ガス種、ガス圧、ガス流量、RF（Radio Frequency）パワー、プラズマ状態、プラズマ発生方式、装置の電極形状など）、電界条件（電界方向、電界強度）などにより構造を制御することが可能であり、内殻106および外殻108間のサイズ、ギャップGのサイズ、形成位置、形状、カーボン系材料の様に層状の構造を形成する材料に関しては層の25数、などを制御することができる。

本実施の形態によれば、カーボンナノチューブからなる内殻106および外殻108がそれぞれ接続されている信号入力側電極部110、信号出力側

電極部 112 の電極材料として、Fe、Co、Ni などのカーボンナノチューブの成長の触媒材料を用いているので、それぞれカーボンナノチューブからなる内殻 106 および外殻 108 は自己組織化し、人工的に調整することなく内殻 106 の振動検出に必要なギャップ G は好適なサイズで容易に形成  
5 される。

これにより、内殻 106、106a および外殻 108 が微小構造物であり、これら内殻 106、106a および外殻 108 との間のギャップ G が人工的に形成困難な微小なギャップであっても、信号入力側電極部 110、信号出力側電極部 112 を触媒として内殻 106、106a および外殻 108 が自己組織化して成長することにより、所定の周波数の信号を検出可能な微小な電気機械フィルタ 100 を容易に製造することができる。  
10

また、内殻 106、106a および外殻 108、外殻 118 により構成される多殻構造は、ナノプローブなどを用いたナノマニュビュレーティング、ナノマニュファクチャリングにより成形可能である。本実施の形態のような  
15 カーボン系材料の構造体の場合には、外殻 108 や外殻 118 を内殻 106 に被せたり、また、多層カーボンナノチューブの層を抜き出したり、カーボンナノチューブのキャップを外したり、カーボンナノチューブを引っ張るなどの成形を行うことにより制御することが可能である。

なお、内殻 106、106a および外殻 108、118 との電場に非対称性をもたせるため、外殻 108、118 の一部を引っ張る、焼結する、異原子を注入するなどの工程を行うことができる。また、電気機械フィルタ 100 における内殻 106 および外殻 108 は、カーボンナノチューブを用いたが、これに限らず、カーボンナノホーン、フラーレン、タンパク質の様な高分子、Si などの半導体、Al などの金属などを含む、自己組織化によって構造を形成する他の物質であってもよい。また、内殻 106 および外殻 108 は、カーボンナノチューブにイオンドーピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む、複合組成物質であってもよい。さらに、信号入  
20  
25

力側電極部 110、信号出力側電極部 112 の材料としてカーボンナノチューブなどの微小材料を用いることができる。

さらに、電気機械フィルタ 100、100a、100c、100d では、内殻 106、106a を振動子、外殻 108、118 を信号検出用の電極と  
5 したが、これに限らず、内殻 106 に出力信号ポートを接続して内殻 106、  
106b を信号検出用の電極とし、外殻 108、118 に入力信号ポートを接続して外殻 108、118 を振動子として用いてもよい。この場合、上記  
電気機械フィルタ 100、100a の構成において、内殻 106、106a  
には出力信号ポートを接続し、外殻 108、118 に入力信号ポートを接続  
10 することにより可能となる。

また、電気機械フィルタ 100、100a、100c、100d によれば、  
振動子としての内殻 106 の横振動、縦振動、ねじり振動を含む全ての共振  
モードを使用することができる。また、本発明における内殻 106、106  
a および外殻 108、118 からなる多殻構造物を複数、直列または並列に  
15 接続して電気機械フィルタとすることでき、バンドパスフィルタ、バンド  
ストップフィルタ、フィルタバンクなどを構成することができる。

図 8 は本発明に係る電気機械フィルタを用いたフィルタバンク回路のブロ  
ック図である。フィルタバンク回路 1000 は、複数の電気機械フィルタ 7  
00 とスイッチ 800 とを有する。複数の電気機械フィルタ 700 は、それ  
ぞれ、電気機械フィルタ 100 と同様のものであり、それぞれ、各通信シス  
テムに応じて信号通過周波数帯域が異なっている。なお、電気機械フィルタ  
700 として、電気機械フィルタ 100a、100c、100d を用いても  
良い。複数の電気機械フィルタ 700 として、電気機械フィルタ 100、1  
00a、100c、100d のいずれかを複数用いてもよいし、また、これ  
25 ら電気機械フィルタ 100、100a、100c、100d を適宜、所定の  
数分選択して用いてもよい。

このフィルタバンク回路 1000 は、各電気機械フィルタ 700 をスイッ

チ 800 により選択する構成となっている。この様なフィルタバンク回路 1  
000 は、マルチバンド無線機への適用が望まれる。さらに、CVD 法に関しては、  
プラズマ CVD 法などの他の CVD 法を用いることができる。また、内殻 106、106b および外殻 108、118 の成長方向制御のための電  
5 界発生方法は、外部電場発生機構を用いてもよい。また、スペーサ部 114、  
114a と信号入力側電極部 110、信号出力側電極部 112、112a の  
形成は、リフトオフプロセスにより行うことができる。

(実施の形態 2)

図 9 は、本発明の実施の形態 2 における電気機械フィルタの構成を示す斜  
10 視図であり、図 10 は、同実施の形態 2 における電気機械フィルタの構成を  
示す断面図である。なお、図 10 は、図 9 における B-B' 断面を示してい  
る。図 9 及び図 10 いずれに示す電気機械フィルタは、カーボンナノチュ  
ブを用いた構成を示している。

本実施の形態 2 における電気機械フィルタ 200 は、実施の形態 1 における  
電気機械フィルタ 100 と基本的な構造および製造工程は共有している。  
15 したがって、電気機械フィルタ 200 の説明において、図 1 および図 2 に示す電気機械フィルタ 100 と同様の構成については同名称および同符号を付  
して説明は省略する。

電気機械フィルタ 200 と電気機械フィルタ 100 との差違は、信号入力  
20 側電極部 110 がスペーサ部 114b 上に形成されており、外殻 108 に接  
続されていること、内殻 106 の下方に電極部 311 が設けられており、電  
圧  $V_p$  を内殻 106 に印加できる構成となっていること、信号入力側電極部  
110 と信号出力側電極部 112 との間、およびスペーサ部 114b とスペ  
ーサ部 114 との間がギャップ 201 により分離されていることである。

25 ギャップ 201 は、実施の形態 1 における電気機械フィルタ 100 の製造  
工程において、図 6B および図 6D に示す酸化シリコン 214 および電極材  
料 205 を成形するマスクパターンを変えることにより形成可能である。

次に、この電気機械フィルタ200における信号伝播と信号選択の仕組みについて説明する。

- 入力信号ポートより入力された信号は、外殻108に伝搬すると、内殻106と外殻108との電位差によりギャップGにおいて静電気力が発生する。
- 5 この発生する静電気力により、内殻106は励振される。入力信号ポートからは様々な周波数の信号が入力されるが、所定の周波数の信号、つまり、カーボンナノチューブからなる内殻106の共振周波数と同等の周波数の信号が、内殻106を大きく励振させる。なお、図10では振動方向を矢印V1で示している。
- 10 このように内殻106が大きく励振した場合、内殻106と外殻108との間のギャップGが狭くなり、静電容量の増加が生ずる。すると、内殻106の共振周波数の容量変化が生じ、内殻106に電極部311から電圧 $V_p$ が印加されているため、信号出力電極部112側の外殻108に内殻106の共振周波数の信号が励起される。
- 15 励起された信号は、信号出力側電極部112を介して、出力信号ポートへ伝播する。これは、材料の自己組織化により形成された微小ギャップGにより、内殻106の微小振動を検出したことと等価である。
- 一方、内殻106の共振周波数ではない周波数の信号は、内殻106の大きな振幅の振動を励起することができず、静電容量の変化を得ることができない。このため、信号出力側電極部112側の外殻108から信号出力側電極部112、出力信号ポートへ伝播することができない。
- このように、電気機械フィルタ200によれば、所定の周波数の信号を選択して出力することができ、それ以外の信号を遮断することができる。
- すなわち、本実施の形態2によれば、内殻106に所定の周波数の信号が入力されたときに、外殻108は内殻106の物理変化、すなわち、振動を検出するため、カーボンナノチューブまたはフラーレンなどのように所定の周波数の信号が入力されることで物理変化する微小な部材を内殻106に用

いることにより、全体を微小にすることができるとともに、外殻 108 により所定の周波数の信号を選択することができる。

なお、外殻 108 を信号入力電極部 110 側と信号出力電極部 112 側に電気的に分離するため、外殻 108 の一部を引っ張る、焼結する、異原子を注入する、絶縁膜を堆積するなどの工程を行うことで、局所的に絶縁、または電気伝導性の悪い状態にすることができる。また、ギャップ 201 に絶縁体を形成してもよい。

### (実施の形態 3)

図 11 は、本発明の実施の形態 3 における電気機械フィルタの構成を示す斜視図である。

図 11 に示す電気機械フィルタ 300 では、シリコン基板 302 上に酸化シリコンによりなる絶縁膜 304 が形成され、この絶縁膜 304 上にスペーサ部 306 を介して、互いに所定間隔を空けて配置された電極部 310、312、314 が設けられている。

電極部 310、312、314 は、カーボンナノチューブの成長における触媒材料である Fe (鉄)、Co (コバルト)、Ni (ニッケル) などから構成され、スペーサ部 306 を介してそれぞれが接触しないように配置されている。

これら電極部 310、312、314 のうち電極部 310 には、入力信号ポートが接続され、この電極部（以下、「信号入力側電極部」という）310 と、電極部 312 との間には、長尺な筒状の振動子 316 が架設されている。また、この振動子 316 の側方には、振動子 316 の振動により当該振動子 316 を介して入力される信号を出力する電極部（以下、「信号出力側電極部」という）314 が配置されている。

スペーサ部 306 は酸化シリコンにより形成され、触媒材料で形成された電極部 310、312 は、絶縁膜 304 である下地表面からの分子間力などの相互作用が防止されている。

振動子 316 は、上述した内殻 106 と同様の物質であるカーボンナノチューブからなり、信号入力側電極部 310 を介して所定の周波数の信号が入力された際に、信号出力側電極部 314 との間に静電気力が発生し、この静電気力により励振する。そして、信号出力側電極部 314 は、この励振を検出することにより、振動子 316 から、当該振動子 316 に入力された信号と同様の周波数の信号が入力される。なお、振動子 316 は、中心軸に対して対称な構造を有しており、ここでは、その中心軸は、シリコン基板 302 と平行な水平軸としている。

- 次に、本実施の形態 3 における電気機械フィルタ 300 の動作を説明する。
- 10 入力信号ポートから入力される信号は、信号入力側電極部 310 を介してカーボンナノチューブである振動子 316 に伝搬する。その場合、信号により振動子 316 の電位が変化し、信号出力側電極部 314 との間に静電気力の変化が生ずる。この静電気力の変化によって振動子 316 が励振され、振動子 316 と信号出力側電極部 314 との間のギャップ G2 が狭くなる。
- 15 この振動子 316 の機械振動により、振動子 316 と信号出力側電極部 314 との間の静電容量の増加とインピーダンスの減少が生じ、振動子 316 の共振周波数と同等の周波数の信号が信号出力側電極部 314 に伝わり、出力信号ポートへ伝搬する。すなわち、通過帯域外の周波数の信号は、信号出力側電極部 314 には伝播することができない。
- 20 なお、電気機械フィルタ 300において、単層、多層といった層の数、異方性をもった成長方向、グラファイト、カーボンナノチューブ、カーボンナノホーンといった振動子 316 を構成するカーボンナノチューブの形状など、その構造形成は、熱 CVD 法を用いたカーボンナノチューブ形成制御により制御している。このカーボンナノチューブ構造形成については後述する。
- 25 次に、本実施の形態 3 の電気機械フィルタの製造方法を説明する。

図 12A～E は、本発明の実施の形態 3 の電気機械フィルタにおける製造工程を段階的に説明するための断面図である。

先ず、図12Aに示すように、シリコン基板302上に、熱酸化により絶縁膜304（図11参照）となる酸化シリコン404を $1\mu\text{m}$ 程度の厚さで形成し、更にその上に $1\mu\text{m}$ 程度の厚さのスペーサ部306（図11参照）となる酸化シリコン406をスパッタにより形成する。

5 次に、図12Bに示すように、酸化シリコン404上に形成された酸化シリコン406を、ドライエッチングにより成形してスペーサ部306にするため、酸化シリコン406においてスペーサ部306を形成する部分の上面にフォトリソグラフィーによりパターンニングしたフォトレジスト408を形成する。なお、図12Bでは、図12Aの酸化シリコン404は、シリコ10ン基板302の表面に絶縁膜304として形成された状態となっている。

次いで、酸化シリコン406をドライエッチングし、フォトレジスト408をアッシングにより除去する。

すると、図12Cに示すように、フォトレジスト408（図12B参照）をアッシングにより除去することにより、絶縁膜304上の酸化シリコン41506（図12B参照）のうち、フォトレジスト408の下部に位置していた部分が、スペーサ部306として絶縁膜304上に形成される。

次に、電極部の形成を行う。すなわち、図12Dに示すように、Fe、Co、Niなどといったカーボンナノチューブの成長における触媒となる電極材料410をスパッタにより数十nm程度堆積し、スペーサ部306上に堆積した電極材料410部分上に、フォトリソグラフィーにより電極パターンにパターンニングされたフォトレジスト412を形成する。そして、電極材料410のドライエッチングを行った後、フォトレジスト412をアッシングにより除去する。

これにより、フォトレジスト412が堆積されていた電極材料410部分が、スペーサ部306上に電極310、312、314（図11参照）として形成される。なお、これら各電極部310、312、314は、それぞれ所定間隔を空けて形成されており、信号入力側電極部310と電極部312

とは互いに対向して配置され、信号出力側電極部 314 は、信号入力側電極部 310 と電極部 312 とを結ぶ線の中心から、当該線と直交する方向に所定間隔（ギャップ G 2 分）離間して配置されている。図 12D では、信号入力側電極部 310 および電極部 312 となる電極材料 410 部分を図示して  
5 いる。

そして、これら信号入力側電極部 310、電極部 312 などの形成が終わった後、図 12E に示すように、信号入力側電極部 310 と、電極部 312 間に電圧を印加しながら熱 CVD 法によりカーボンナノチューブを形成し、成長方向制御により電極部 310、312 間に架橋するように成長させて、  
10 信号入力側電極部 310、電極部 312 間に架設される微小の機械振動子 316 を作製する。なお、熱 CVD 法に用いられるガスは、メタンガスを用い、その場合の振動子（カーボンナノチューブ）316 の成長温度は、850°C 程度である。

ここで、カーボンナノチューブである振動子 316 の成長制御方法は、振動子 316 の成長方向を水平方向に制御するため、信号入力側電極部 310 と電極部 312 の間に電圧を印加し、振動子 316 の成長方向と同方向に電界を発生させる。なお、ここでは、振動子 316 は信号入力側電極部 310 から成長するようにセットしている。

これより、カーボンナノチューブは、電界方向にクーロン引力を感じ、電界方向に成長を始め、信号入力側電極部 310 と電極部 312との間に架橋された状態となる。

この様な工程においてカーボンナノチューブの成長時間を制御すれば、図 13 に示すように、電気機械フィルタ 300a における振動子 316a を構成するカーボンナノチューブの片持ち梁構造を作製することが可能である。  
25 なお、この電気機械フィルタ 300a は電気機械フィルタ 300 と振動子の構成が異なり、その他の構成は同一である。よって、同一構成には同名称、同符号を付して説明は省略する。

上記の様な自己組織化により形成される振動子 316（図 11 参照）は、  
CVD 法、スパッタ法などの材料堆積条件（ガス種、ガス圧、ガス流量、RF  
パワー、プラズマ状態、プラズマ発生方式、装置の電極形状など）、電界条件  
(電界方向、電界強度) などにより構造を制御することが可能であり、振動  
子 316 のサイズ、ギャップ G 2 のサイズ、形成位置、形状、カーボン系材  
料の様に層状の構造を形成する材料に関しては層の数、などを制御するこ  
とができる。

本実施の形態によれば、カーボンナノチューブからなる振動子 316 が接  
続されている信号入力側電極部 301、信号出力側電極部 314 の電極材料  
として、Fe、Co、Ni などのカーボンナノチューブの成長の触媒材料を  
用いているので、それぞれカーボンナノチューブからなる振動子 316 は自  
己組織化し、人工的に調整することなく振動子 316 の振動検出に必要なギ  
ャップ G 2 は好適なサイズで容易に形成される。

これにより、振動子 316 が微小構造物であり、これら振動子 316、3  
16a と信号出力側電極部 314との間のギャップ G 2 が人工的に形成困難  
な微小なギャップであっても、信号入力側電極部 301、信号出力側電極部  
314 を触媒として振動子 316 が自己組織化して成長することにより、所  
定の周波数の信号を検出可能な微小な電気機械フィルタ 300 を容易に製造  
することができる。

本実施の形態によれば、信号が入力信号ポートから信号入力側電極部 31  
0 を介して振動子 316 に入力された場合、振動子 316 の自己共振周波数  
と同等の周波数の信号のときに、振動子 316 は励振され、信号出力側電極  
部 314 との間の静電容量の増加とインピーダンスの減少が生じて、信号が  
信号出力側電極部 314 に伝搬するので、所定の周波数の信号を選択して出  
力することができる。

なお、信号出力側電極部 314 に対向して、かつ、振動子 316 を挟んだ  
位置に、制御信号電源に接続された制御電極部をさらに設け、振動子 316

の振動を制御してもよい。

また、電気機械フィルタ 100 における振動子 316 は、カーボンナノチューブを用いたが、これに限らず、カーボンナノホーン、フラーレン、タンパク質の様な高分子、Si などの半導体、Al などの金属などを含む、自己組織化によって構造を形成する他の物質であってもよい。  
5

また、振動子 316 は、カーボンナノチューブにイオンドーピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む、複合組成物質であってもよい。さらに、信号入力側電極部 301、信号出力側電極部 314、電極部 3  
10 12 の材料としてカーボンナノチューブなどの微小材料を用いることができる。

さらに、図 11、図 13においては、振動子 316、316a を単数として示したが、複数本構成されていても良い。また、振動子 316 を構成するカーボンナノチューブは、多層または单層カーボンナノチューブ、多層または单層カーボンナノホーンを用いることができる。また、本実施の形態で挙げた振動子 316 は、中が空洞の円筒形を示したが、これに限らず、円柱形、  
15 円錐形、角柱形、角錐形を含む他の形状であっても良い。

また、電気機械フィルタ 300、300a によれば、振動子 316、31  
6a の横振動、縦振動、ねじり振動を含む全ての共振モードを使用するこ  
ができる。また、本実施の形態における電気機械フィルタ 300、300a  
20 を、直列または並列に複数接続して電気機械フィルタとすることができます、バ  
ンドパスフィルタ、バンドストップフィルタ、フィルタバンクなどを構成す  
ることができる。

例えば、図 8 のフィルタバンク回路のブロック図に示すフィルタバンク回  
路 1000 において、電気機械フィルタ 700 を電気機械フィルタ 300、  
25 300a を直列または並列に複数接続して形成する。この構成による効果は  
フィルタバンク回路 1000 において、電気機械フィルタ 100、100a、

100c、100dを電気機械フィルタ700として用いた場合と同様であるため説明は省略する。

さらに、振動子316、316aを製造する際に熱CVD法を用いたが、これに限らず、プラズマCVD法などの他の化学気相成長法を用いることにより5 製造してもよい。また、振動子316、316aの成長方向制御のための電界発生方法は、外部電場発生機構を用いてもよい。さらに、スペーサ部306と各電極部310、312、314の形成は、リフトオフプロセスにより行うようにしてもよい。

(内殻106、外殻108および振動子316、316aであるカーボンナ10 ノチューブの振動検出方法)

図14は本発明に係る電気機械フィルタにおける振動子の振動検出方法の一例を説明するための図である。図14Aは、実施の形態1の電気機械フィルタにおける内殻として用いられるカーボンナノチューブの振動検出を説明するための断面図、図14Bは、図14Aにおいて、検出されたトンネル電15 流を示す図である。

上述した各微小な電気機械フィルタ100、100a、300、300aなどにおける内殻106、振動子316としてのカーボンナノチューブの振動は、微小な変位の振動であり、この振動を検出にあたり、ここでは、トンネル電流をプローブの一部として用いる走査トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscopy; 以下、「STM」という)により行う。

図14Aに示す電気機械フィルタ100bは、図2に示す電気機械フィルタ100において、外殻108、スペーサ部114、信号出力側電極部112を除いた構成である。よって、電気機械フィルタ100と同様の構成要素には同符号を付して説明は省略する。

25 電気機械フィルタ100bでは、シリコン基板104上に形成された絶縁膜102の表面に、信号入力側電極部110を介してカーボンナノチューブなどによりなる振動子としての内殻106が立った状態で設けられている。

電気機械フィルタ 100 b が備えるカーボンナノチューブからなる振動子としての内殻 106 の周囲に、STM（図示省略）の探針 502 を配置する。探針 502 と内殻 106 との距離は、トンネル電流 504 が流れる程度（数十オングストローム）であり、内殻 106 が振動（振動方向を矢印 V1 で示す）した際の探針 502 と内殻 106 との間の距離の変化を、トンネル電流 504 の変化で検知する。

これにより、図 14B に示すように、内殻 106 の振動は、トンネル電流の振動として検出され、トンネル電流 504 の振動の周波数が、カーボンナノチューブである内殻 106 の振動周波数となる。なお、ギガヘルツ帯の振動を実現する内殻 106 は、ナノオーダーの微小な構造物であり、その振動の変位は、数十オングストロームと微小である。その変位のオーダーは、丁度原子レベルの表面構造を検出する STM の分解能と同レベルであるため、この微小な振動の検出に STM の原理を用いるのは好適であり、高い精度の測定を行うことができる。

この振動検出方法は、実施の形態 3 における電気機械フィルタ 300 の構成にも適用できる。図 15 は実施の形態 3 の電気機械フィルタにおける振動検出方法の応用例を説明するための斜視図である。

図 15 に示す電気機械フィルタ 300 b は、図 11 の電気機械フィルタ 300 において、信号出力側電極部 314 を除いた構成である。よって、電気機械フィルタ 300 と同様の構成要素には同符号を付して説明は省略する。

この電気機械フィルタ 300 b は、シリコン基板 302 上に形成された絶縁膜 304 の表面に、スペーサ部 306 を介して信号入力側電極部 310、電極部 312 が所定間隔を空けて設けられ、これら信号入力側電極部 310 および電極部 312 間にカーボンナノチューブである振動子 316 が架設されている。

このように構成された電気機械フィルタ 300 b において、振動子 316 の振動検出を行う際には、振動子 316 の上方に、STM（図示省略）の探

針 502 を配置する。ここで、探針 502 と振動子 316 との距離は、上述した電気機械フィルタ 100a における振動検出のときと同様に、トンネル電流が流れる程度（数十オングストローム）であり、振動子 316 が垂直方向に振動した際（振動方向を矢印 V2 で示す）の探針 502 と振動子 316 との間の距離の変化を、トンネル電流の変化で検知する。なお、この場合、垂直方向の振動発生のために、下方の各電極部 310、312 やシリコン基板 302 に制御信号電源 505 を接続することができる。

なお、STM の探針 502 の位置決めは、STM と走査形電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope：以下「SEM」という）を組み合わせた装置、  
STM-SEM 内で行っても良く、トンネル電流検出中は、SEM による電子ビームが外乱の原因となる恐れがあるため、SEM は使用しなくても良い。

電気機械フィルタ 100b、300b におけるカーボンナノチューブ製の内殻 106 および振動子 316 の振動検出方法によれば、STM の探針 502 を用い、内殻 106 および振動子 316 と、探針 502 間を流れるトンネル電流の変化で検知するため、微小な振動でも容易に検出することができる。  
よって、マグネットモーティブの手法、レーザードップラー干渉法、レーザー反射用の金属やシリコン（Si）製のミラーなどにより検出する方法等とは異なり、検出のために外部磁場を発生させる大きな装置や、検出作業のための大きなスペース等が必要なく、さらにミラーを用いた場合にミラーも含めた振動を検出することがなく、容易に、微小な内殻 106 および振動子 316 自体の振動特性を検出することができる。

#### （実施の形態 4）

図 16 は本発明の実施の形態 4 に係る電気機械フィルタの構成を示す斜視図である。

図 16 に示す電気機械フィルタ 600 では、シリコン基板 602 の表面に酸化シリコンからなる絶縁膜 604 が形成されている。この絶縁膜 604 上に所定間隔空けて酸化シリコンからなるスペーサ部 606 を介して電極部 6

08、610が配置されている。

電極部608には信号が入力される入力信号ポートが接続され、電極部610には、電極部610から信号を出力する出力信号ポートが接続されている。

- 5 これら電極部608、610間には、電極部608、610の対向方向と直交する方向に延在してカーボンナノチューブである振動子612が配置され、この振動子612の振動により電極部610に信号が伝播した状態となる。なお、この振動子612は図示しない支持部材により支持されている。また、振動子612は、中心軸に対して対称な構造を有しており、ここでは、  
10 その中心軸は、シリコン基板602と平行な水平軸である。

- カーボンナノチューブである振動子612は、両側の電極部608、610のそれぞれから所定間隔離れた位置に配置され、電極部608に信号が入力された際に、振動子612と電極部608、610との間に生じる静電気力により励振する。また、振動子612は、自己共振周波数と同等の周波数  
15 を有する信号が入力された際に振動し、電極部610へ伝搬される。

- なお、スペーサ部606は、振動子612と下地である絶縁膜604間の分子間力の影響が、カーボンナノチューブからなる振動子612の駆動特性に影響を及ぼす恐れがあるために設けられている。つまり、各電極部608、610はカーボンナノチューブを挟んで対向するように配置する必要がある  
20 ため、スペーサ部606は、各電極部608、610と絶縁膜604とを絶縁する。

- この電気機械フィルタ600では、所定の周波数の信号が入力信号ポートから入力されると、電極部608を介してカーボンナノチューブである振動子612に伝搬する。その場合、信号により振動子612の電位が変化し、  
25 電極部610との間に静電気力の変化が生ずる。

この静電気力の変化によって振動子612が励振され、振動子612と電極部610との間のギャップが狭くなる。ギャップが狭くなることにより、

振動子 612 と電極部 610 との間の静電容量の増加とインピーダンスの減少が生じ、振動子 612 の共振周波数と同等の周波数の信号が、電極部 610 に伝わり、出力信号ポートへ伝搬する。すなわち、通過帯域外の周波数の信号は、信号出力側電極部 610 には伝播することができない。

5 よって、電気機械フィルタ 600 によれば、所定の周波数の信号を選択的に出力することができる。

図 17 は、実施の形態 4 における電気機械フィルタの変形例を示す平断面図である。

図 17 に示す電気機械フィルタ 600a は、図 16 に示す実施の形態 4 に 10 対応する電気機械フィルタ 600 において振動子の構成が異なり、その他の構成は電気機械フィルタ 600 と同様の構成を有する。したがって、共通する部分の説明は省略し、異なる部分についてのみ、図に即して説明する。

電気機械フィルタ 600a は、振動子にカーボンナノチューブを用いたメカニカルアクチュエータの駆動方式であり、多層カーボンナノチューブの内殻 614 を振動子とし、この内殻 614 を外殻 616 内で振動させる構成である。内殻 614、外殻 618 は、それぞれ、中心軸に対して対称な構造を有している。ここでは、その中心軸は、シリコン基板上の絶縁膜 602 と平行な水平軸である。

すなわち、電気機械フィルタ 600a における多層カーボンナノチューブ 618 は、外殻 616 の両端、もしくは片側一方の端のキャップを取ることにより、この端の開放された外殻 616 内で、内殻 614 が軸方向に動くように構成されている。

詳細には、多層カーボンナノチューブ 618 は、筒状の外殻 616 内に、筒状の内殻 614 が同軸心上に配置され、内殻 614 の両端部は、外殻 616 の両端部より外方に突出した形状をなしている。

また、多層カーボンナノチューブ 618 の外殻 616 の側周部（外殻 616 の軸と略水平に且つ、直交する方向に位置する外面部分）は、入力信号ポ

ート、出力信号ポートがそれぞれ接続された各電極部 608、610 に接続されている。

このような電気機械フィルタ 600aにおいて、入力信号ポートから信号が電極部 608 に入力されると、電極部 608 から外殻 616 に伝搬し、外殻 616 から内殻 614 の両端部が突出した状態においては、外殻 616 と内殻 614 が接する原子面間で分子間力(ファンデルワールス力)が発生し、内殻 614 は、外殻 616 内に引き込まれて、外殻 616 の一端部側から他端側に移動する。

分子間力によるポテンシャルエネルギーが最も低い安定な状態においては、内殻 614 が外殻 616 に引き込まれる運動エネルギーは最も高い状態となる。また、内殻 614 が逆側で瞬間に静止した状態においては、再び分子間力によるポテンシャルエネルギーが最大の状態となり、運動エネルギーは零となる。

この運動は、外殻 616 の一端部分と、他端部分のそれぞれで繰り返されることになり、内殻 614 は外殻 616 内で、下に凸型のポテンシャル曲線上を運動する振り子の単振動と同様な運動を行う。

すなわち、内殻 614 は外殻 616 内で内殻 614 及び外殻 616 の軸方向に往復運動、つまり、振動することとなる。なお、内殻 614 の振動を制御するため、イオンドーピングや分子注入などにより内殻 614 のカーボンナノチューブに誘電性をもたせ、外部電場により振動を発生させている。

また、外部電場は、外殻 616 に接続された電極部 608 と電極部 610 との間に発生する。内殻 614 の外殻 616 内での移動による変位により、内殻 614 の静電容量が変化し、電気的に結合することにより信号は電極部 610 を介し出力信号ポートへ伝播される。

なお、多層カーボンナノチューブ 618 の長手方向に信号出力側電極部を設け、振動子である内殻 614 のカーボンナノチューブと信号出力側電極部とのギャップが狭くなった時、信号が信号出力側電極部へ伝搬する信号選択

の仕組みとしてもよい。

また、外殻 616 と、信号入力側電極部 608、信号出力側電極部 610 の界面には、接合時に形成される絶縁層があつてもよい。さらに、内殻 614 および外殻 616 との電場に非対称性をもたせるため、外殻 616 の一部 5 を引っ張る、焼結する、異原子を注入するなどの工程を行うことができる。

また、電気機械フィルタ 600a における内殻 614 および外殻 616 は、カーボンナノチューブを用いたが、これに限らず、カーボンナノホーン、フ 10 ラーレン、タンパク質の様な高分子、Si などの半導体、Al などの金属など 15 を含む、自己組織化によって構造を形成する他の物質であつてもよい。

また、内殻 614 および外殻 616 は、カーボンナノチューブにイオンド 20 一ピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む、複合組成物質であつてもよい。さらに、信号入力側電極部 608、信号出力側電極部 610 の材料としてカーボンナノチューブなどの微小材料を用いることができる。

また、図 16においては、振動子 612 を単数として示したが、複数本構成されていても良い。また、図 17においては、内殻 614、外殻 616 を構成するカーボンナノチューブおよびカーボンナノホーンは、それぞれ 3 層の多層カーボンナノチューブとして示したが、これに限らず、他の層数であつてもよく、多層または单層カーボンナノチューブ、多層または单層カーボ 25 ンナノホーンを用いることができる。また、本実施の形態で挙げた内殻 614、外殻 616 は、それぞれ中が空洞の円筒形、円錐形を示したが、これに限らず、円柱形、円錐形、角柱形、角錐形を含む他の形状であつても良い。

また、電極部 608、電極部 610 は、カーボンナノチューブの成長における触媒材料である Fe (鉄)、Co (コバルト)、Ni (ニッケル) などの 25 材料で作製することができる。さらに、カーボンナノチューブ 618 を複数用意し、これら複数の多層カーボンナノチューブ 618 どうしを上述したように、それぞれの両側部で入出力側電極部 608、610 が接続されるよう

に直列に接続して電気機械フィルタとしてもよい。また、上記電気機械フィルタ 600a を並列に接続した構成としてもよい。

また、内殻 614 および外殻 616 により構成される多殻構造は、ナノプローブなどを用いたナノマニュピュレーティング、ナノマニュファクチャリングにより成形可能である。本実施の形態のようなカーボン系材料の構造体の場合には、外殻 616 を内殻 614 に被せたり、また、多層カーボンナノチューブの層を抜き出したり、カーボンナノチューブのキャップを外したり、カーボンナノチューブを引っ張るなどの成形を行うことが可能である。

また、電気機械フィルタ 600a によれば、振動子としての内殻 614 の外殻 616 内での長手方向の振動、長手方向と垂直方向の振動、回転振動、ねじり振動を含む全ての共振モードを使用することができる。また、本実施の形態における内殻 614 および外殻 616 からなる多殻構造物を複数、直列または並列に接続して電気機械フィルタとすることができます、バンドパスフィルタ、バンドストップフィルタ、フィルタバンクなどを構成することができる。例えば、図 8 のフィルタバンク回路 1000において、各通信システムに応じた信号通過周波数帯域の異なった複数の電気機械フィルタ 700 を、内殻 614 および外殻 616 からなる多殻構造物を複数、直列または並列に接続して形成する構成が挙げられる。また、スペーサ部 606 と信号入力側電極部 608、信号出力側電極部 610 の形成は、リフトオフプロセスにより行うことができる。

#### (実施の形態 5)

図 18 は、本発明の実施の形態 5 における電気機械フィルタの構成を示す斜視図である。

図 18 に示す電気機械フィルタ 400 は、図 14 の電気機械フィルタ 100b と同様に構成される共振部 401 と、共振部 401 の振動を検出する探針 402、探針 402 と共振部 401 との間の距離を調整する調整部 403 とを有する。

共振部401では、図14に示す電気機械フィルタ100と同様に構成されてなり、表面に絶縁膜102が形成されたシリコン基板104上に信号入力側電極部110が設けられ、この信号入力電極部110の上面に振動子106bが立った状態で設けられている。

5 信号入力側電極部110は、振動子106bに信号を入力するものである。また、振動子106bは、図14に示す振動子としての内殻106と同様のものであり、自己組織化により形成されたカーボンナノチューブによりなる。また、振動子106bは、中心軸に対して対称な構造を有しており、ここでは、その中心軸は、シリコン基板104に対して垂直な軸となっている。

10 一方、探針402は、図14で示す探針502と同様のものであり、この探針402は調整部403により、共振部401の振動子106bに対して接離方向に移動する。この探針402の移動は、探針402と振動子106bとの間に働く力を変化させ、振動子106bの固有振動数を変化させる。また、探針402は、実施の形態1の外殻108と同様の作用効果を有する。

15 つまり、探針402は、共振部401の振動を検知する電極としても機能し、共振部401の振動子106bに所定の周波数の信号が入力されたときに、振動子106bの物理変化を検出して、図示しない出力信号ポートに出力する。なお、信号出力ポートは、ここでは図示しないが、各実施の形態の信号出力ポートと同様の構成作用を有するものであり説明は省略する。

20 調整部403は、例えば、カンチレバーであり、探針402が先端に設けられたレバー本体403aと、レバー本体403aの基端に接続され、レバ一本体403aを可動させる可動本体部403bとを有する。このレバー本体403aは、可撓性を有し、探針402の振動に伴い振動する。

25 また、可動本体部403bは、レバー本体403aを振動子106bに対して接離方向に移動して、探針402と振動子106bとの距離を変化させる。例えば、可動本体部403bは、電気機械フィルタ本体の所定位置に固定し、ステッピングモータを用いて、可動本体部403bに対してレバー本体

403aを移動させることにより、レバー本体403a自体を振動子106bから離間する方向に移動させる構成が挙げられる。

図18に示すように、振動子106bと探針（プローブ）402間の距離をL、探針402が振動する際の振幅をAとすると、可動本体部403bに  
5 対して、レバー本体403aを移動、つまり、探針402を移動することにより、距離Lを変化させ、振動子106bの振幅Aを変化させる。つまり、  
距離Lを変化させることにより、探針402と振動子106bとの距離L1  
が変化する。

この距離L1の変化、つまりは距離Lを変化させることにより、微小な振  
10 動子106bの固有振動数は変化する。

ここで、振動子106bの固有振動数について説明する。微小な振動子106bの固有振動数は、上述したように振動子自体のサイズで決まる。このため、振動子106bが所望のサイズで製作できなければ、所望の共振周波数を有する電気機械フィルタを実現することができない。ここでは、振動子  
15 106bは、円筒形状（詳細には、筒状の本体部と、本体部の先端部を塞ぐキャップ部が設けられた有蓋円筒形状）であるので、円筒形状の振動子として説明する。

図19は、円筒型の振動子の高さと固有振動数の関係を示す図である。図  
19に示すように、上記の（式1）から、共振周波数は振動子の長さの-2  
20 乗で比例するため、僅かな振動子の製作誤差は、共振周波数のずれを生じさせている。いま所望の共振周波数を1GHzとすると、振動子の材料によって異なるが、カーボンナノチューブの場合、およそ共振器の高さは0.06  
 $\mu m$ となる。

振動子の高さが、所望の0.06 $\mu m$ から1%の誤差（0.0606 $\mu m$ ）  
25 で作製された場合、共振周波数は2%変化して、1.02GHzとなり、中心周波数が20MHz変化することになる。

この振動子の中心周波数ずれの許容量は、振動子を有する電気機械フィル

タが電波を受信したり、送信する際のフィルタとして無線システムに用いられた場合、その無線システムに依存する。しかし、20MHzの中心周波数のずれを許容する無線システムは、一般的にはないため、このずれ量は無視できない値となる。

5 このため、精度の高い振動子の製作方法、もしくは振動子106bの周波数チューニング機構を備えることが望ましい。

この本実施の形態5の電気機械フィルタ400は、上記構成により、精度が高い周波数チューニングを行うことができる。

10 次に、本実施の形態の電気機械フィルタ400で行うことができる周波数チューニングについて説明する。

一般的にカンチレバー（非特許文献「原子・分子のナノ力学」丸善株式会社 p53からp56）によると、カンチレバーと試料表面間のギャップdが変化すれば、カンチレバーと試料表面に働く力の向きと大きさが変化するため、共振周波数が変化することが知られている。下記の（式2）に共振周波数の15 変動量、つまり、振動子106bの固有振動数からのシフト量 $\Delta\nu$ を示す。

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi KA} \int_0^{2\pi} F(L + A \cos \Psi) \cos \Psi d\Psi \quad \dots \text{ (式2)}$$

$\nu$ 、A、Lはそれぞれカンチレバーの共振振動数、振動振幅、カンチレバーと試料表面の平行位置を示す。

20  $\Delta\nu$ はカンチレバーと試料間の力Fの1周期にわたっての重みつき平均に比例する。したがって、小振幅極限  $A \ll L$  では、探針402と振動子106bの間で働く力Fは、 $\Delta\nu$ に比例する。

つまり、探針402と振動子106b間に働く力の大きさにより、振動子106bの共振周波数は可変できる。これにより、調整部403は、振動子106bの製造誤差などから生じる共振周波数のずれ量を補正する役目を担25 うことできる。

力Fの大きさは探針402と振動子106b間に働く力の発生メカニズム

で変化する。これは探針 402 と振動子 106b の相対的な位置関係によつて決定する。

振動子 106b と探針 402 が十分離れていれば、振動子 106b と探針 402 間に相互作用が発生しないため、力 F は発生しないが、探針 402 が  
5 振動子 106b と近づくと、両者の間で引力が発生し、力 F が生じる。

引力は距離の $-2$ 乗で比例するため、探針 402 と振動子 106b の距離が近いと、力 F も大きくなる。さらに、探針 402 を振動子 106b に近づけて、探針 402 と振動子 106b 間の距離を短くすると、振動子 106b と探針 402 間に斥力が生じ、力 F の方向は反転する。

10 このように、振動子 106b と探針 402 間の距離を変化させることで、両者に働く力の大きさ、方向を変化させることができる。

図 20 は、探針 402 の振幅と、振動子 106b の共振周波数との関係を示す図である。なお、図 20 では、縦軸に振幅、横軸に振動子 106b の共振周波数を示し、各グラフ Q、R、S はそれぞれの領域での特性を示している。なお、図 20 中、q、r、s は、同一の角周波数 ( $\omega_d$ ) での振動振幅をそれぞれ示す。但し、グラフ Sにおいて、点線で示した領域は不安定な領域であるため、実際のスペクトルは実線で示している。つまり、曲線 S では低周波数側と高周波数側でそれぞれ不連続な変化をもつ。

20 図 20 に示すように、探針 402 の位置と振動子 106b の位置が十分離れている場合、図中のグラフ Q のように力 F が働かないため、振動子 106b は固有振動数で振動する。

探針 402 を振動子 106b に近づければ、探針 402 と振動子 106b の間に引力が作用し、図中のグラフ R に示すように共振周波数は低周波側にシフトする。

25 さらに、探針 402 を振動子 106b に接近させて、斥力領域に入った場合、力 F の向きが反転し、振動子 106b の共振周波数は、図中のグラフ S に示すように高周波側にシフトする。

なお、本実施の形態 5において、探針 402 の振動を検出する方法としては、実施の形態 3 と同様に、静電容量の変化を検出、トンネルの電流を検出する方法もあり、また通常の原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy：AFM）のように光により検出してもよい。

5 また、本実施の形態 5 の電気機械フィルタ 400 では、振動子 106b の製造誤差を補償するだけではなく、当然、それ以外の要因から生じる共振周波数の変化に対しても補償することができる。また、電気機械フィルタ 400において、通過帯域の中心周波数を可変させることができるとなるため、例えば、無線端末装置に用いた場合、チャネル選択、バンド選択などが可能となり、可変フィルタとしても適用できる。

以上のように各実施の形態における本電気機械フィルタによれば、導電性に優れたカーボンナノチューブなどの微小の振動子を用いることで全体を微小にすることもできるとともに、所定の周波数の信号を選択することができる。

また、以上のように各実施の形態における、微小な振動子としてカーボンナノチューブを用いた電気機械フィルタにより、高周波回路上での受動部品の小型化を実現し、大静電容量高速通信に向けた、使用帯域の高周波数化、及び端末の小型化に対応した次世代通信装置を実現させることができる。

本発明の第 1 の態様は、信号が入力されることにより物理変化する第 1 部材と、前記第 1 部材から所定間隔空けて配置され、前記第 1 部材に所定の周波数の信号が入力されたときに、前記第 1 部材の物理変化を検出する第 2 部材とを有する構成を探る。

この構成によれば、第 1 部材に所定の周波数の信号が入力されたときに、第 2 部材は第 1 部材の物理変化を検出するため、例えば、カーボンナノチューブ、フラーレンなどのように所定の周波数の信号が入力されることで物理変化する微小な部材を第 1 部材に用いることにより、全体を微小にするとともに、第 2 部材により所定の周波数の信号を選択することができる。

本発明の第2の態様は、上記構成において、前記第1部材は、当該第1部材の中心軸に対して対称構造を有するとともに、信号が入力されることにより振動し、前記第2部材は、前記第1部材に所定の周波数の信号が入力されたときに、前記第1部材の振動を検出する構成を探る。

- 5 この構成によれば、第1部材の中心軸に対して対称構造を有する第1部材に、所定の周波数の信号が入力されたときに、第2部材は、第1部材の振動を検出するため、第1部材を用いるだけで、所定の周波数の信号を選択できる。例えば、第1部材に、カーボンナノチューブ、フラーレンなどのように所定の周波数の信号が入力されることによって振動する微小な部材を用い、  
10 全体を微小にすることができるとともに、第2部材により所定の周波数の信号を選択することができる。

本発明の第3の態様は、上記構成において、前記第1部材および前記第2部材のうち、一方の部材は他方を覆う殻状の部材である構成を探る。

- この構成によれば、第1部材および第2部材のうち、一方の部材は他方を  
15 覆う殻状の部材であるため、これら第1部材および第2部材は殻構造をなし、第1部材および第2部材のうち他方に一方が被さる分、例えば、第1部材に第2部材が被さる分、占有スペースを小さくすることができ、電気機械フィルタ全体のスケールを更に小さくすることができる。

- 本発明の第4の態様は、上記構成において、前記第1部材に接続され、当  
20 該第1部材に信号を入力することにより励振させる入力側電極と、前記第2部材に接続され、当該第2部材が前記第1部材の振動を検出した際に、前記第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力側電極と、  
25 を更に有する構成を探る。

- この構成によれば、入力側電極から第1部材に所定の周波数の信号が入力  
25 されたとき、第2部材が第1部材の物理変化としての振動を検出し、出力側電極は、第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力するため、所定の周波数を選択的に出力することができる。

本発明の第5の態様は、上記構成において、前記第1部材から所定間隔空けて配置され、信号が入力されることにより前記第1部材を励振させる入力側電極とを更に備え、前記第2部材は、前記第1部材の振動を検出した際に、前記第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力側電極  
5 である構成を探る。

この構成によれば、入力側電極に所定の周波数の信号が入力されたとき、第2部材は第1部材の振動を検出し、第2部材は、出力側電極として、入力された信号と同様の周波数の信号を出力するため、所定の周波数を選択的に出力することができる。

10 本発明の第6の態様は、上記構成において、前記第2部材は前記第1部材を覆う殻状の部材であり、前記第2部材に接続され、当該第2部材に信号を入力することにより前記第1部材を励振させる入力側電極と、前記第1部材に接続され、当該第1部材に電圧を印加する電極と、前記第2部材に接続され、当該第2部材が前記第1部材の振動を検出した際に、前記第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力側電極とを有する構成を探る。  
15

この構成によれば、第2部材が第1部材を覆い、入力側電極から第2部材に所定の周波数の信号が入力されたとき、第2部材が第1部材の物理変化としての振動を検出し、出力側電極は、第2部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力するため、第1部材と第2部材とが並列配置されることなくコンパクト化、つまりは、より微小化された構造において、所定の周波数を選択的に出力することができる。つまり、構造的に前端的に微小なフィルタを実現できる。

20 本発明の第7の態様は、上記構成において、前記第1部材および第2部材のうち少なくとも第1部材は、カーボンナノチューブやカーボンナノホーン、フラーレンを含む自己組織化により形成される物質により構成され、前記所定の間隔は少なくとも前記第1部材による自己組織化によって形成される微

小ギャップである構成を探る。

- この構成によれば、振動子となる第1部材が、少なくとも自己組織化により形成される物質により構成され、所定の間隔が自己組織化によって形成される微小ギャップであるため、所定の間隔を人工的に形成する必要が無く、
- 5 第1部材および第2部材を所定間隔空けて配置する構成を容易に形成することができる。例えば、所定の間隔が、人工的に形成が困難な微小な間隔であっても、第1部材の自己組織化により容易に形成することができる。

本発明の第8の態様は、上記構成において、前記第1部材および前記第2部材のうち少なくとも前記第1部材は、触媒材料により成長するように構成され、前記触媒材料を含む電極材料からなる電極部に接続されている構成を探る。

この構成によれば、第1部材および第2部材のうち、少なくとも第1部材は、触媒材料を含む電極部に接続されているため、第1部材を電極部に接続するだけで、成長させることができる。

15 本発明の第9の態様は、上記構成において、前記第1部材および第2部材は、カーボンナノチューブにイオンドーピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む複合組成物質である構成を探る。

この構成によれば、第1部材および第2部材は、カーボンナノチューブにイオンドーピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む複合組成物質であるため、第1部材および第2部材は誘電性を有し、第1部材および第2部材間の電場により、第1部材は物理変化として励振し、第2部材は第1部材に所定の周波数の信号が入力されたときに共振するので、第2部材を介して第1部材に入力された所定の周波数の信号を選択的に出力することができる。

25 本発明の第10の態様は、上記構成において、前記第1部材および第2部材は、微細加工技術を用い人工的に成形される構成を探る。

この構成によれば、第1部材および第2部材は、微細加工技術を用い人工

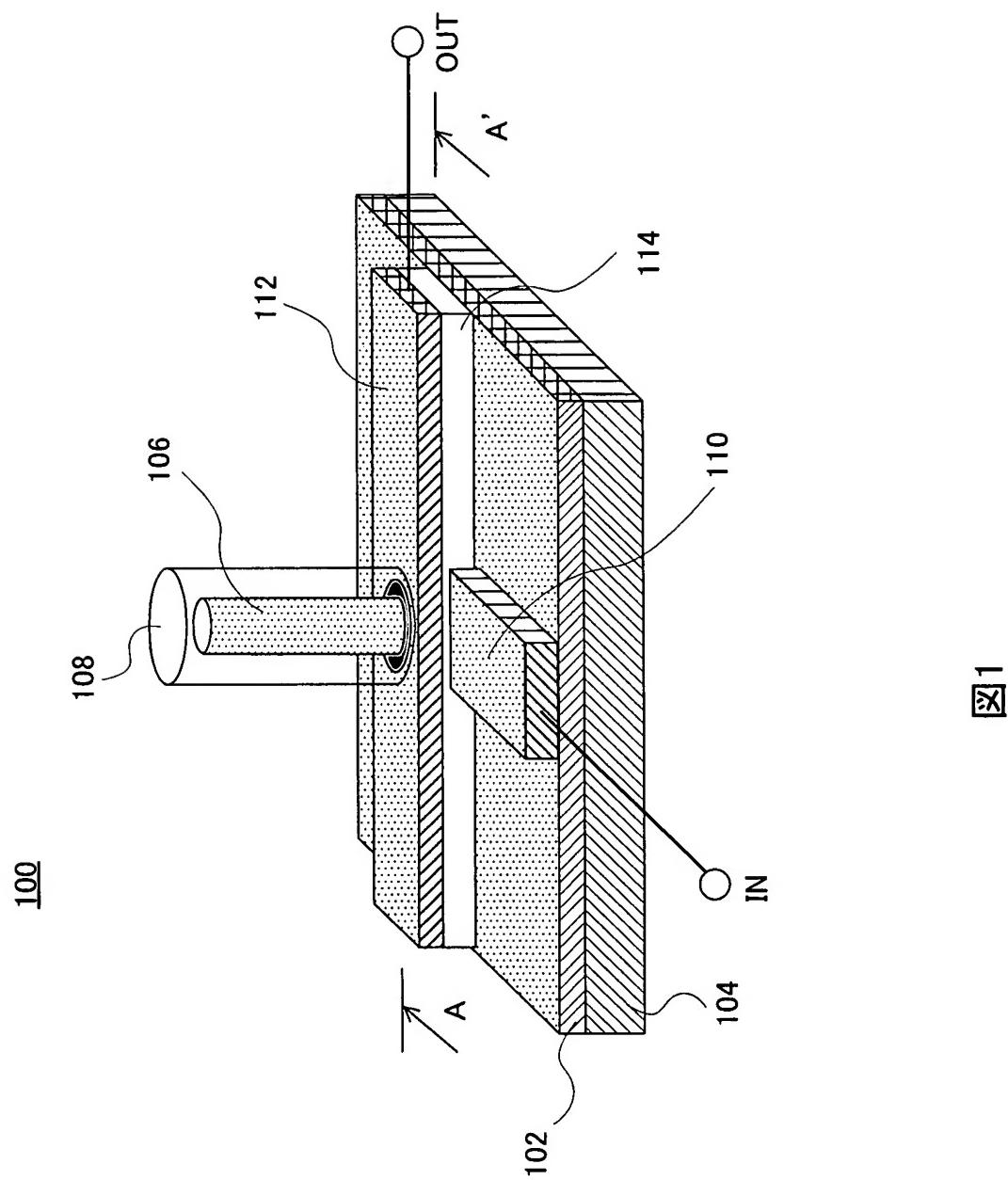
## 請求の範囲

1. 信号が入力されることにより物理変化する第1部材と、  
前記第1部材から所定間隔空けて配置され、前記第1部材に所定の周波数  
5 の信号が入力されたときに、前記第1部材の物理変化を検出する第2部材と  
を有する電気機械フィルタ。
2. 前記第1部材は、当該第1部材の中心軸に対して対称構造を有すると  
ともに、信号が入力されることにより振動し、  
前記第2部材は、前記第1部材に所定の周波数の信号が入力されたときに、  
10 前記第1部材の振動を検出する請求項1記載の電気機械フィルタ。
3. 前記第1部材および前記第2部材のうち、一方の部材は他方を覆う殻  
状の部材である請求項1記載の電気機械フィルタ。
4. 前記第1部材に接続され、当該第1部材に信号を入力することにより  
励振させる入力側電極と、  
15 前記第2部材に接続され、当該第2部材が前記第1部材の振動を検出した  
際に、前記第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力  
側電極と、  
を更に有する請求項1記載の電気機械フィルタ。
5. 前記第1部材から所定間隔空けて配置され、信号が入力されることに  
より前記第1部材を励振させる入力側電極とを更に備え、  
前記第2部材は、前記第1部材の振動を検出した際に、前記第1部材に入  
力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力側電極である請求項1記  
載の電気機械フィルタ。
6. 前記第2部材は前記第1部材を覆う殻状の部材であり、  
25 前記第2部材に接続され、当該第2部材に信号を入力することにより前記  
第1部材を励振させる入力側電極と、  
前記第1部材に接続され、当該第1部材に電圧を印加する電極と、

前記第2部材に接続され、当該第2部材が前記第1部材の励振を検出した際に、前記第1部材に入力された信号と同様の周波数の信号を出力する出力側電極と、

を更に有する請求項1記載の電気機械フィルタ。

- 5 7. 前記第1部材および前記第2部材のうち少なくとも第1部材は、カーボンナノチューブやカーボンナノホーン、フラーレンを含む自己組織化により形成される物質により構成され、前記所定の間隔は少なくとも前記第1部材による自己組織化によって形成される微小ギャップである請求項1記載の電気機械フィルタ。
- 10 8. 前記第1部材および前記第2部材のうち少なくとも前記第1部材は、触媒材料により成長するように構成され、前記触媒材料を含む電極材料からなる電極部に接続されている請求項1記載の電気機械フィルタ。
9. 前記第1部材および前記第2部材は、カーボンナノチューブにイオンドーピングを施した物質および他原子分子を内包した物質を含む複合組成物  
15 質である請求項1記載の電気機械フィルタ。
10. 前記第1部材および前記第2部材は、微細加工技術を用い人工的に成形される請求項1記載の電気機械フィルタ。
11. 前記第1部材の物理変化は振動することであり、前記第1部材の振動検出は、前記第1部材に入力される信号を出力する電極に接続されたプロ  
20 ッブを用いて、前記第1部材と前記電極との間に流れるトンネル電流を検出することにより行われる請求項1記載の電気機械フィルタ。
12. 前記第1部材は物理変化として振動し、前記第1部材と前記第2部材との間の前記所定間隔を変化させ、前記第1部材の共振周波数を変化させる調整部を更に有する請求項1記載の電気機械フィルタ。
- 25 13. 請求項1記載の電気機械フィルタを用いたフィルタバンクを含む電気回路。
14. 請求項13記載の電気回路を有する電気機器。



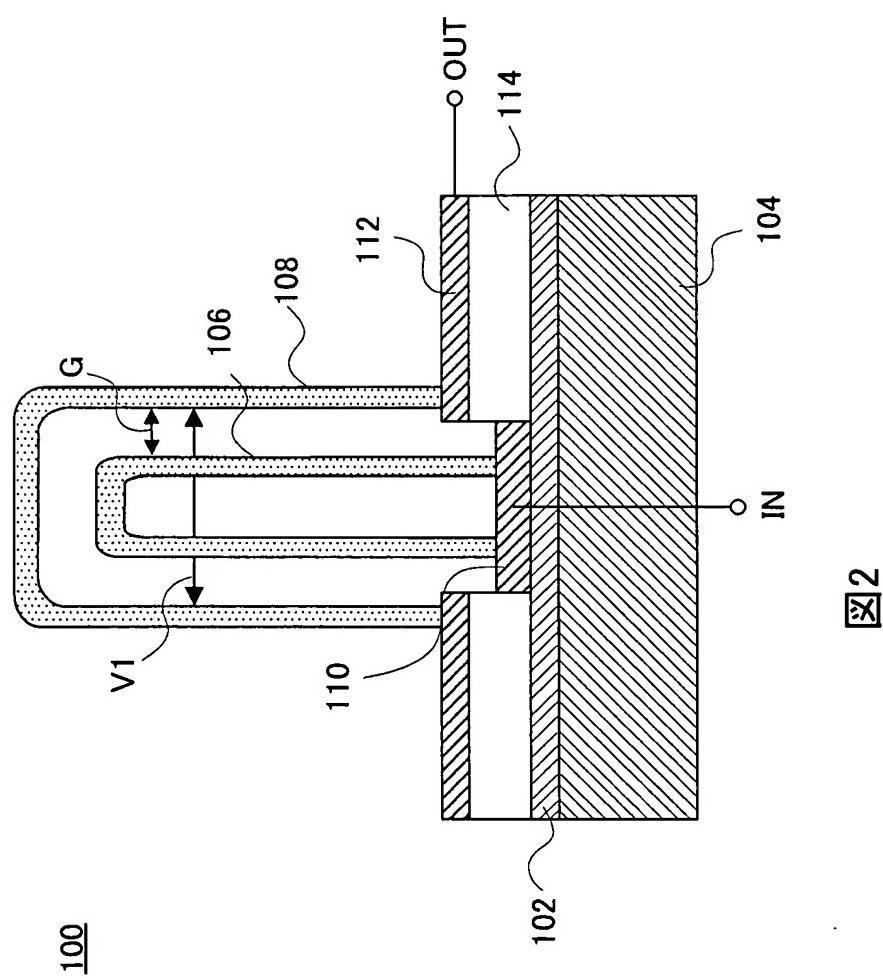
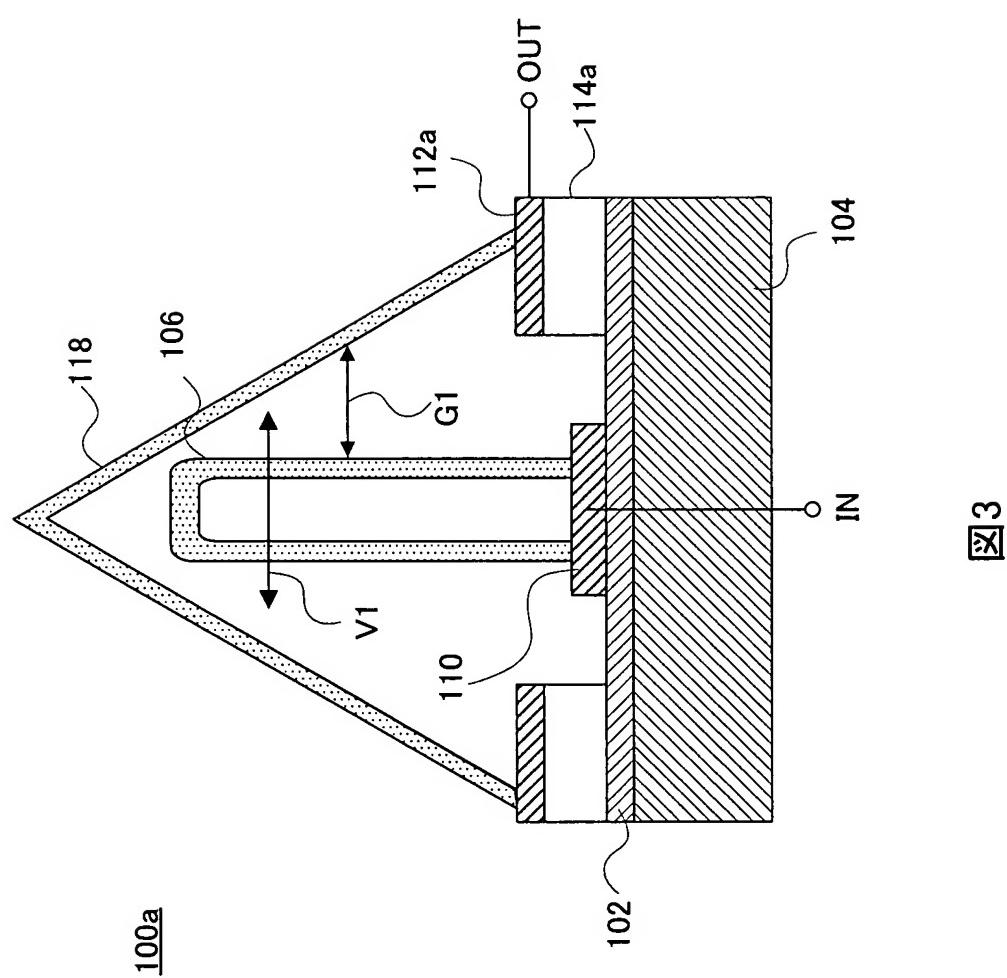
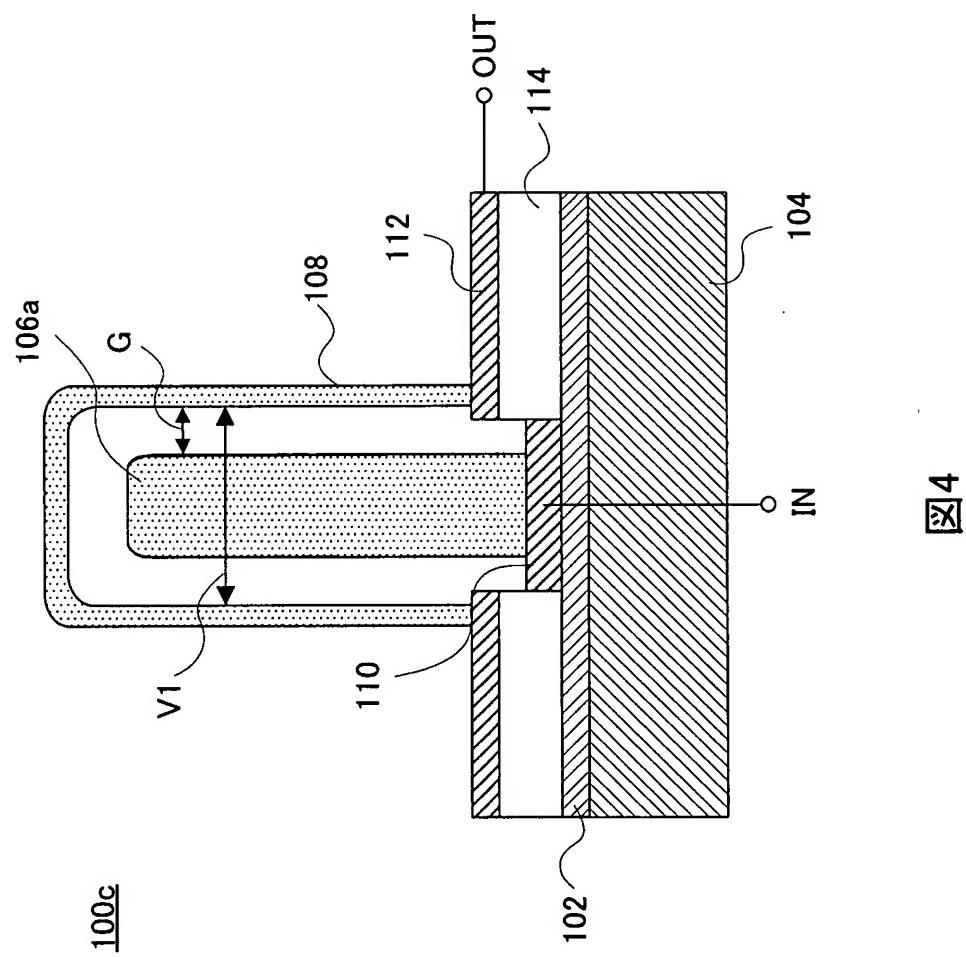
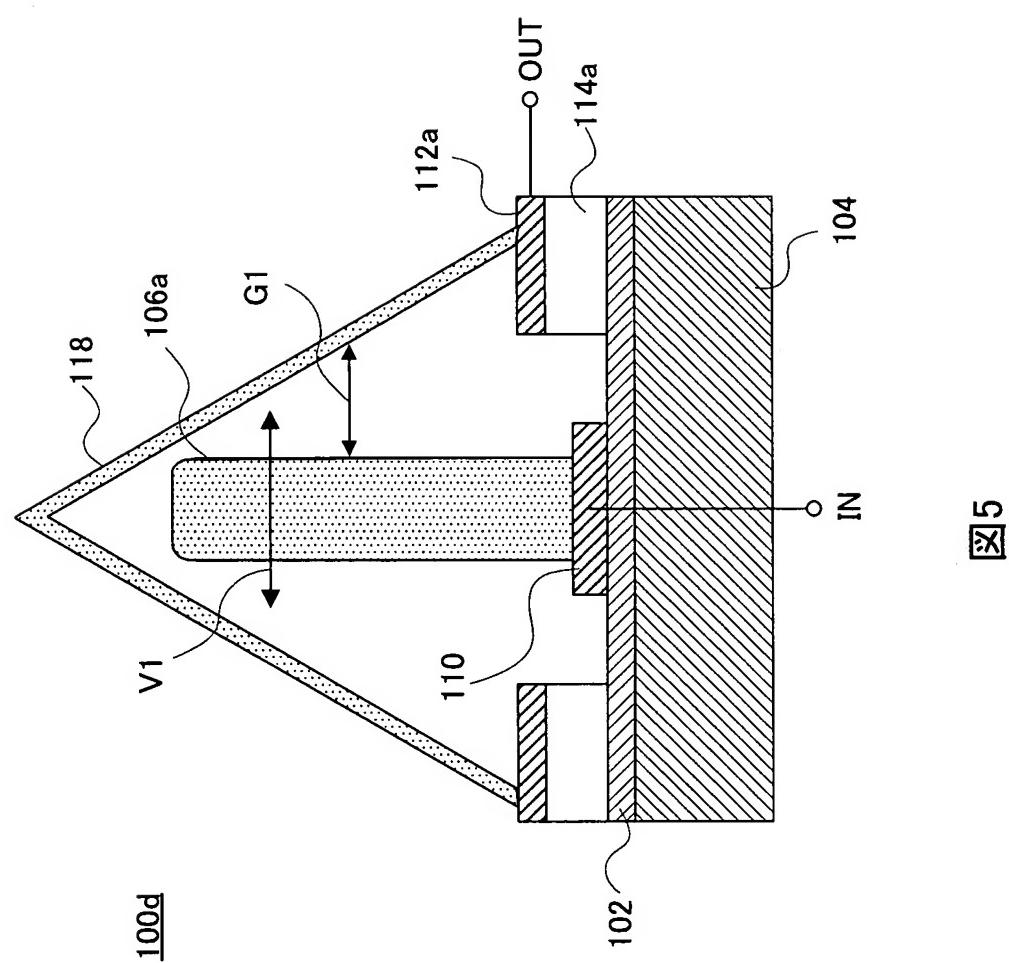


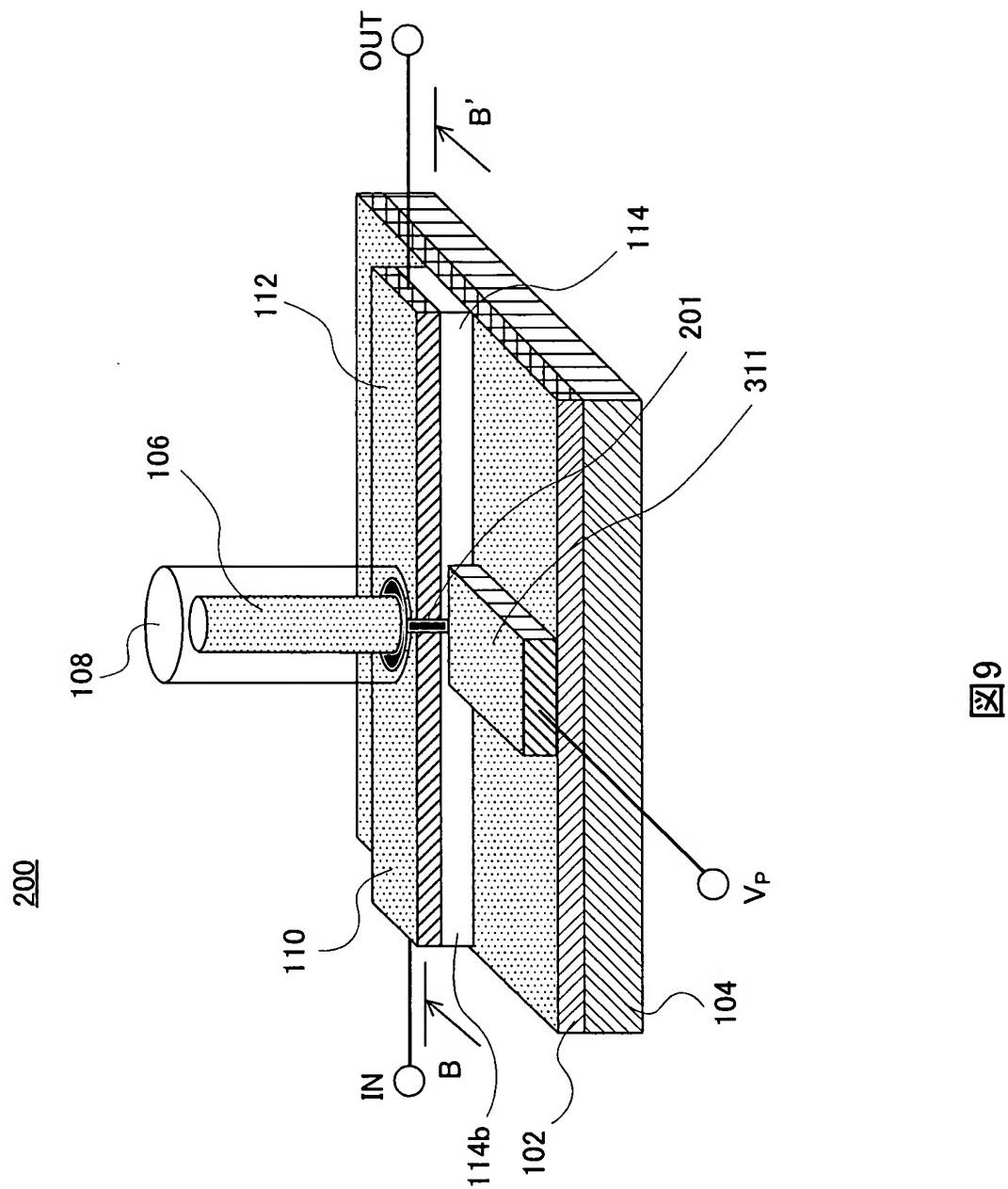
图2



☒ 3







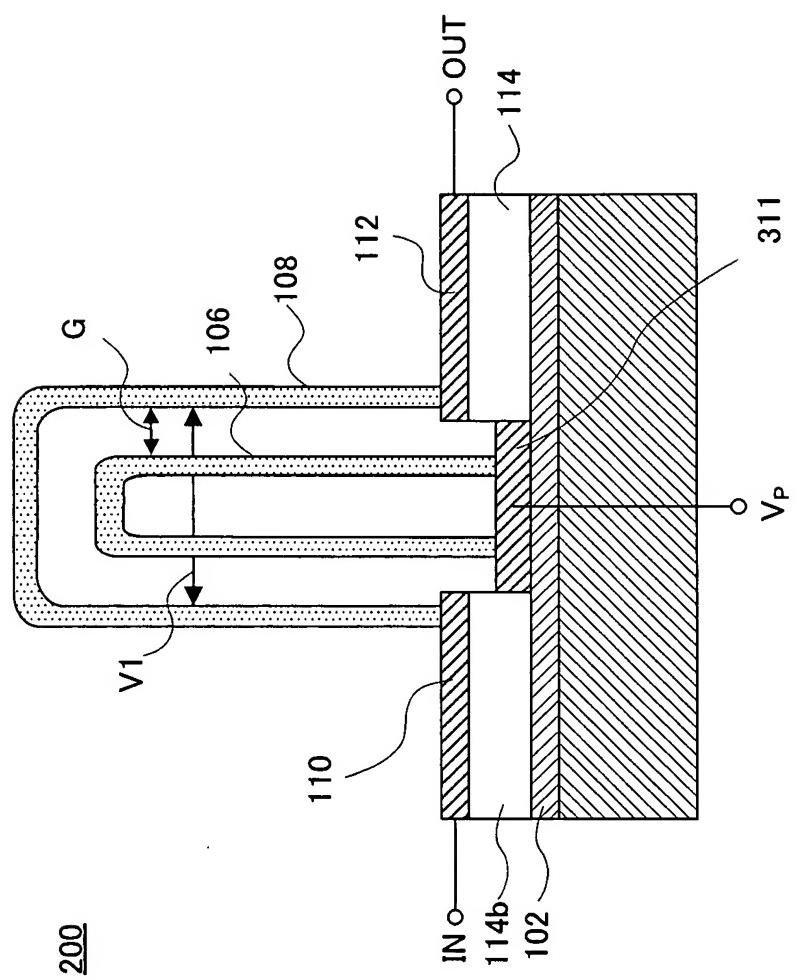


図 10

200

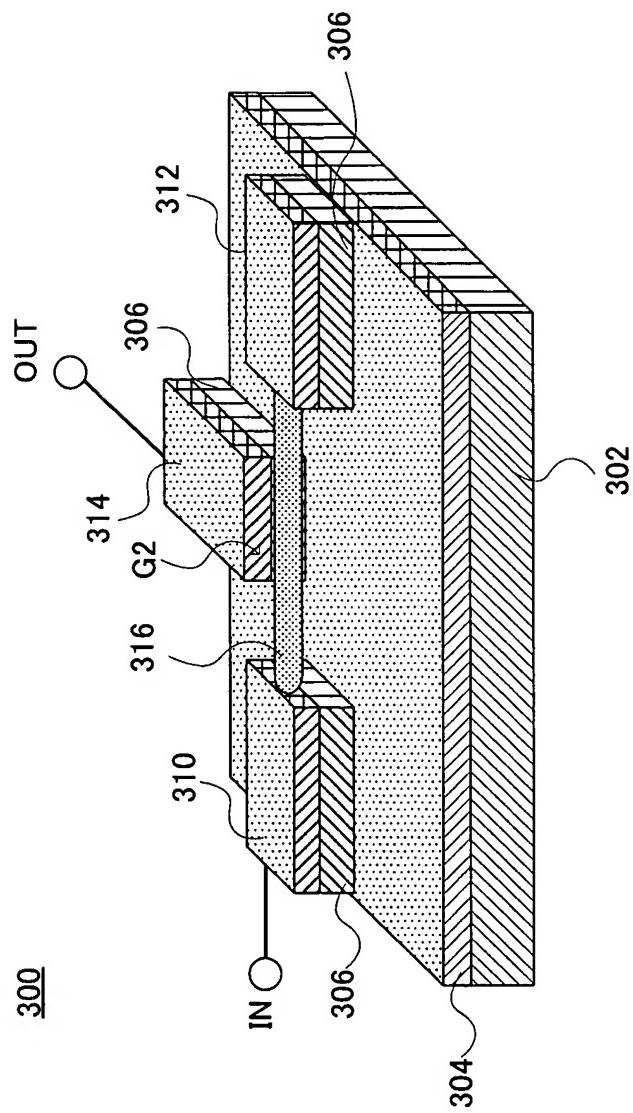


図11

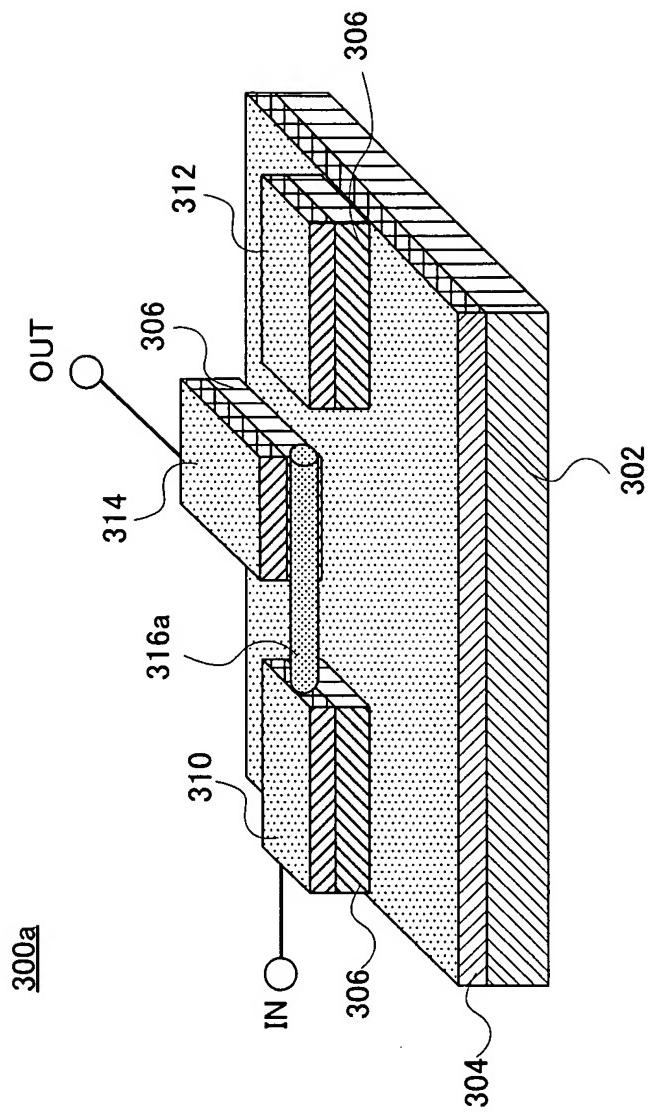


图13

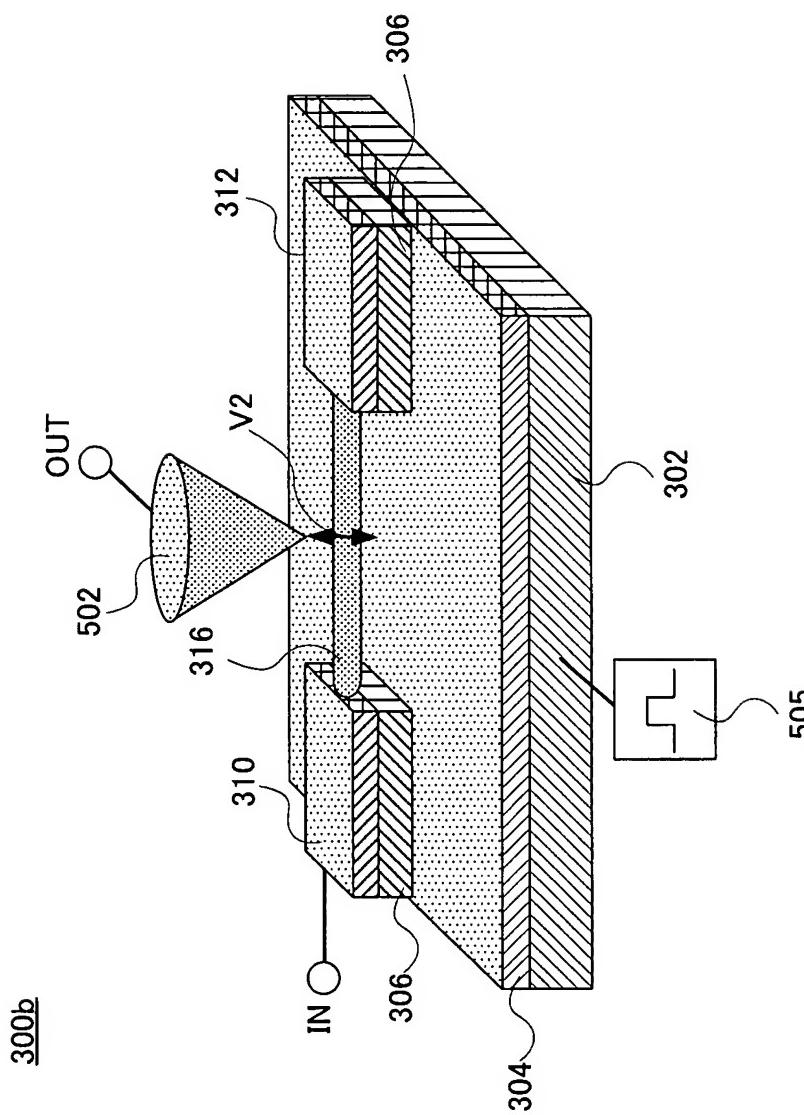


図15

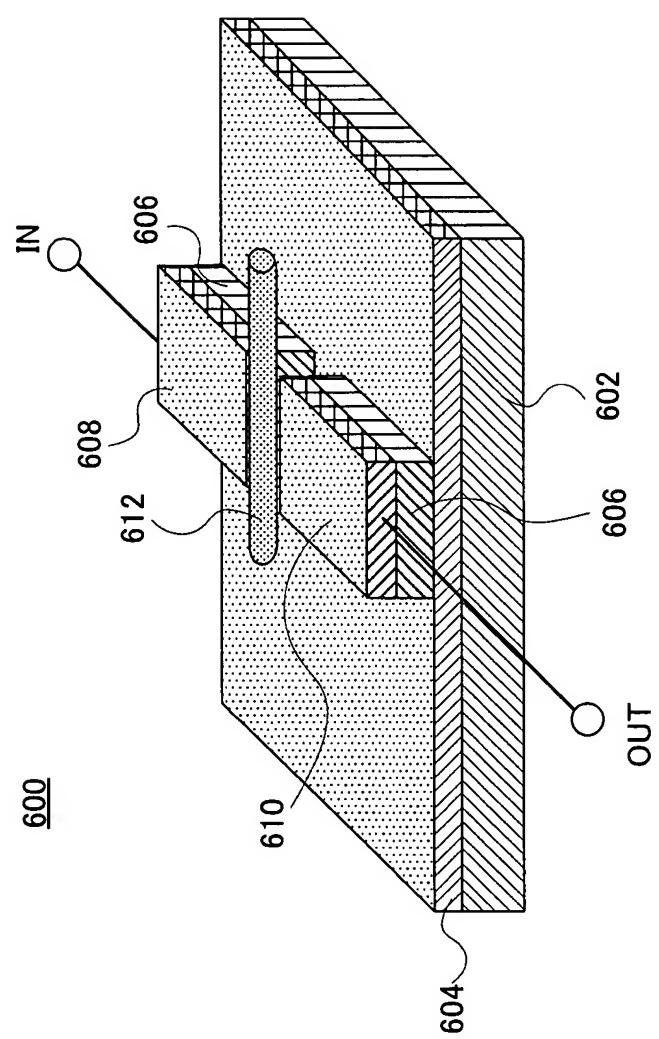


図16

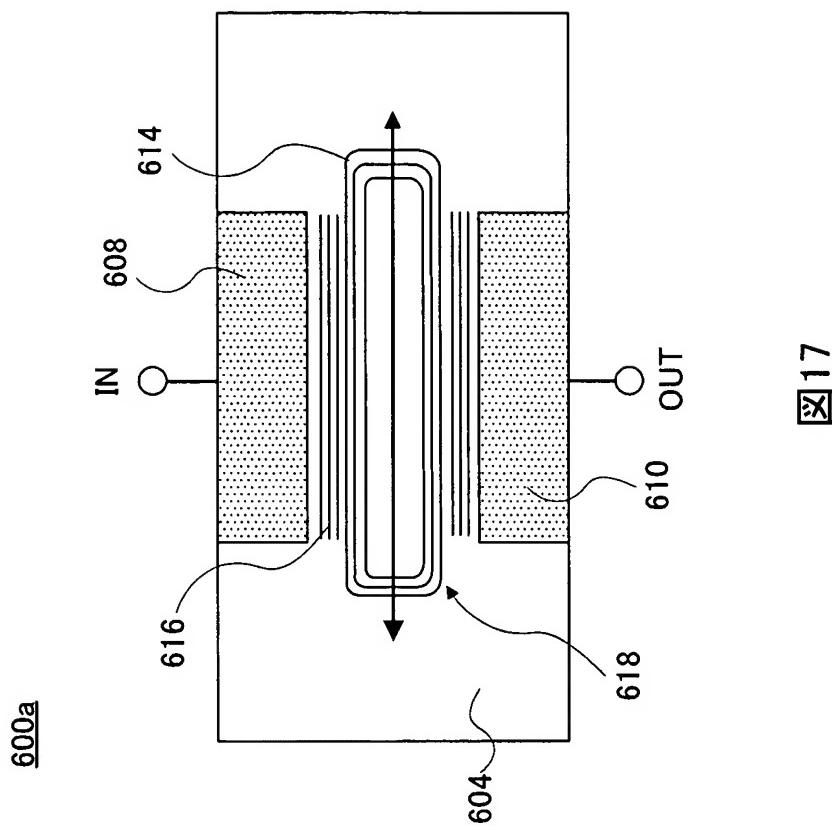


図17

6/20

図6A

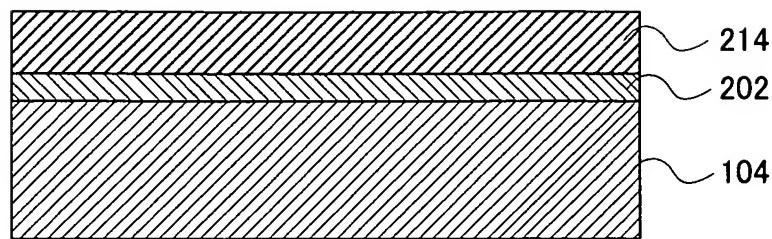


図6B

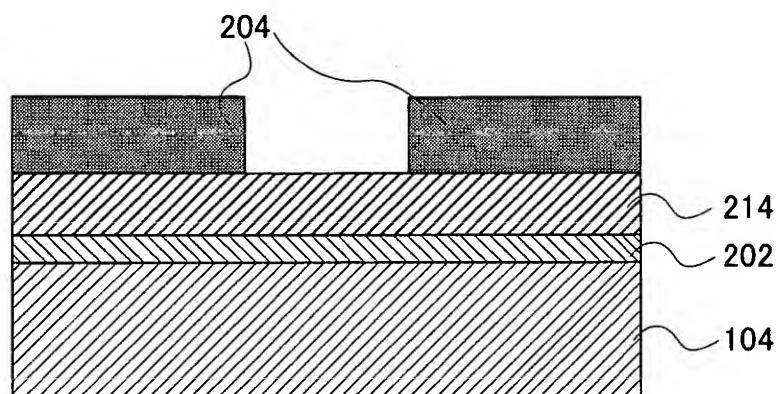


図6C

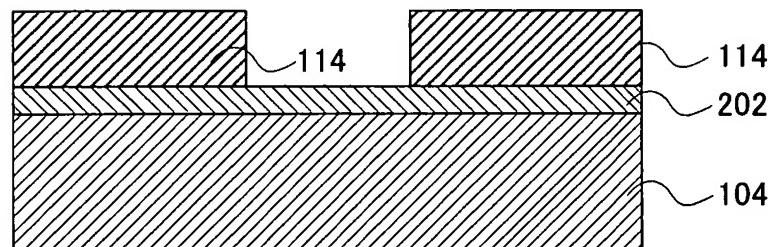
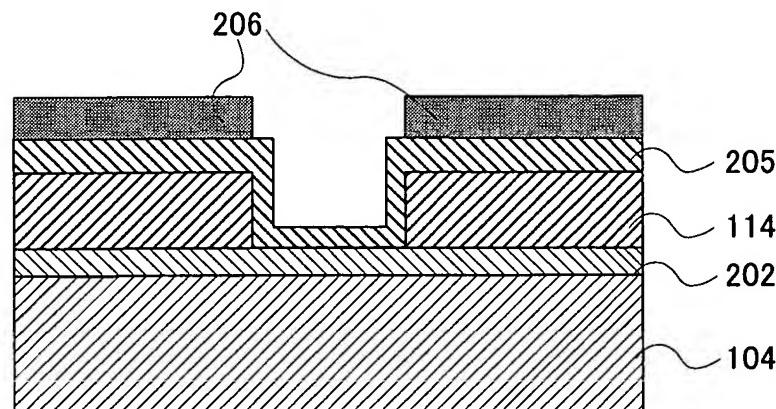


図6D



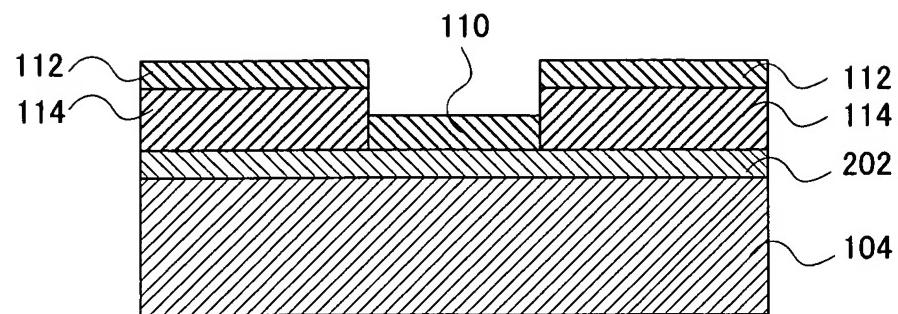


図7A

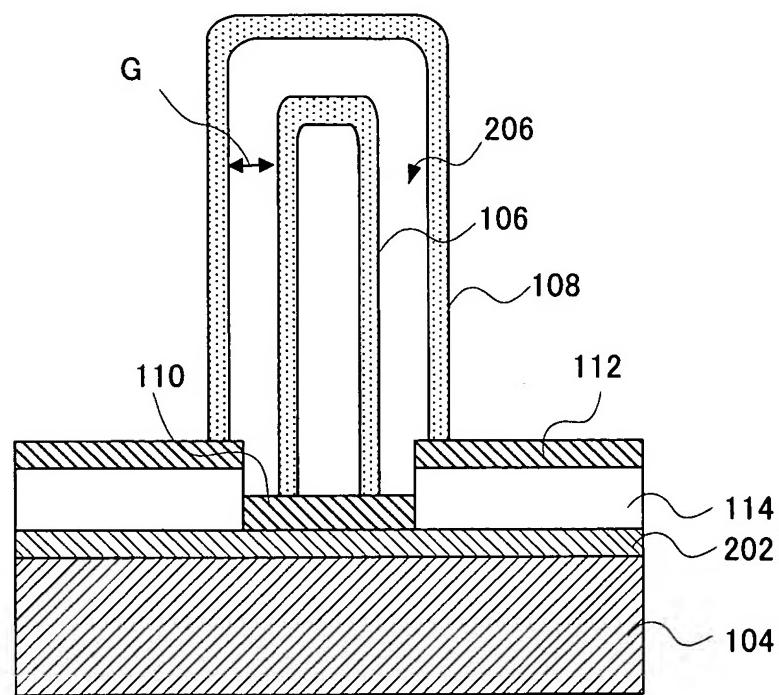


図7B

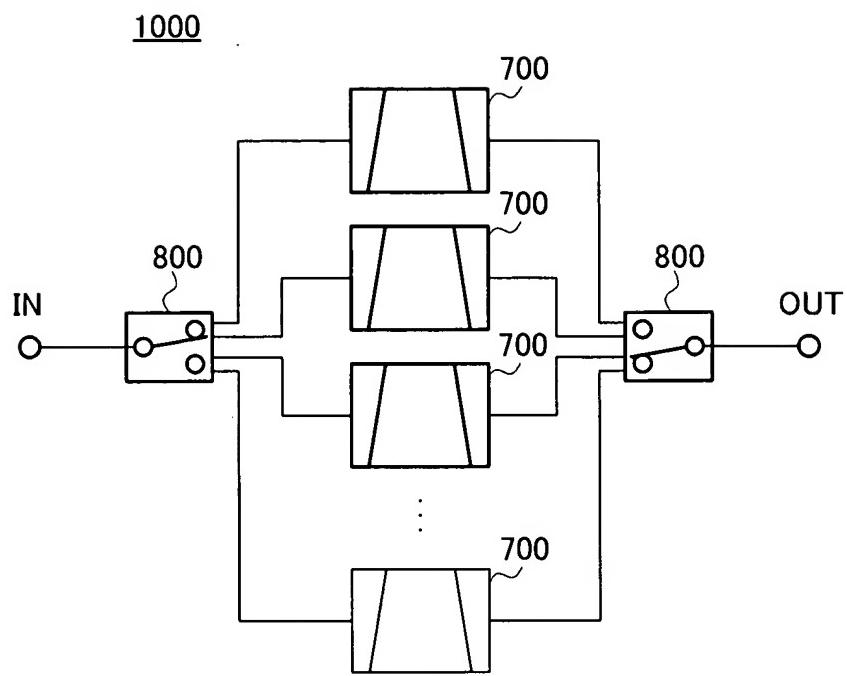


図8

12/20

図12A

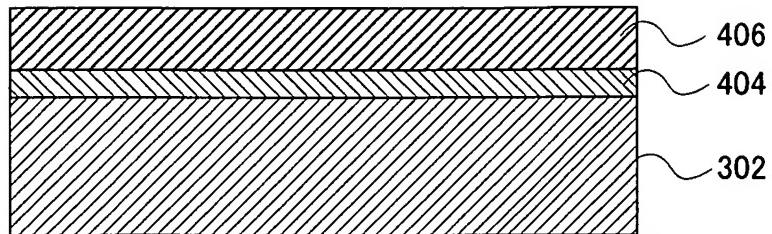


図12B

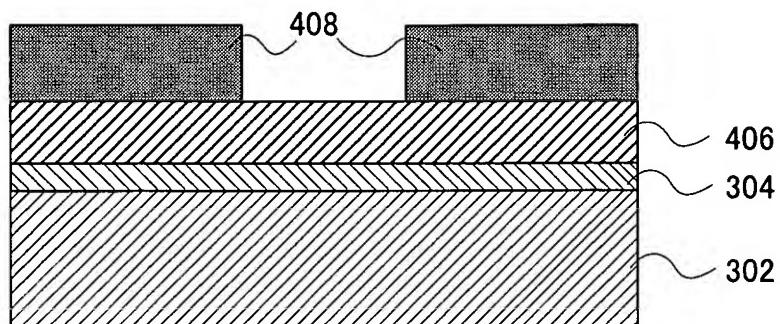


図12C

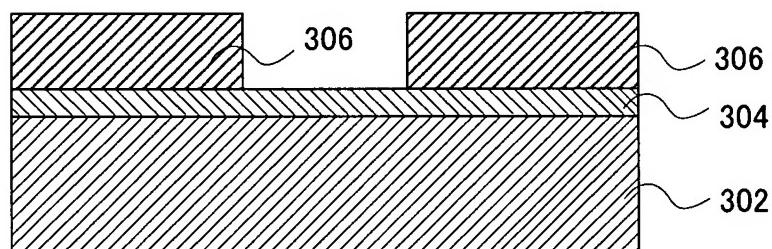


図12D

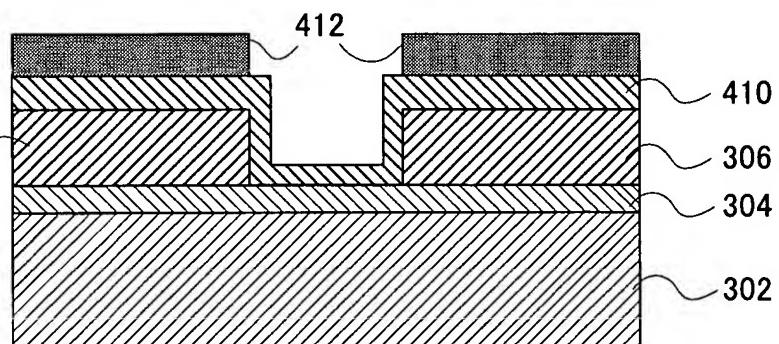
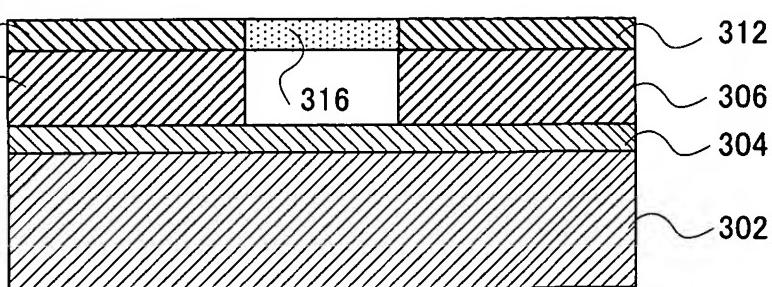


図12E



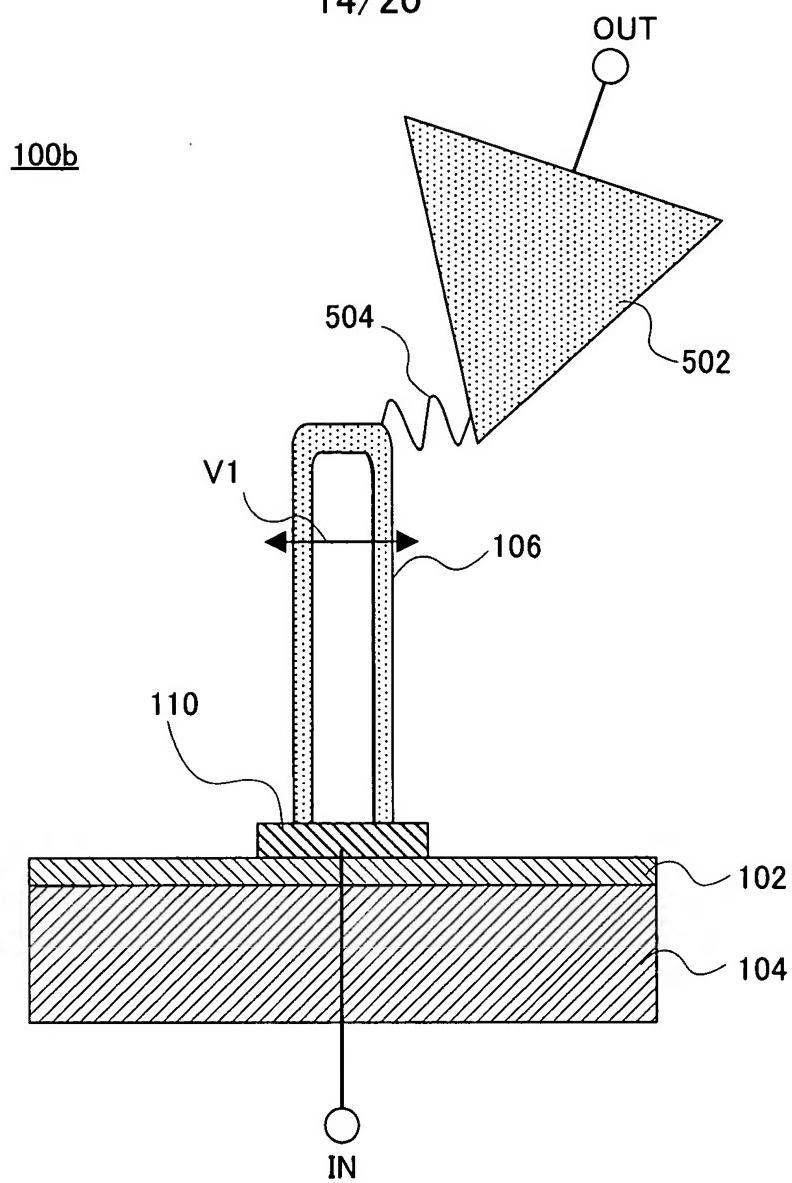


図14A

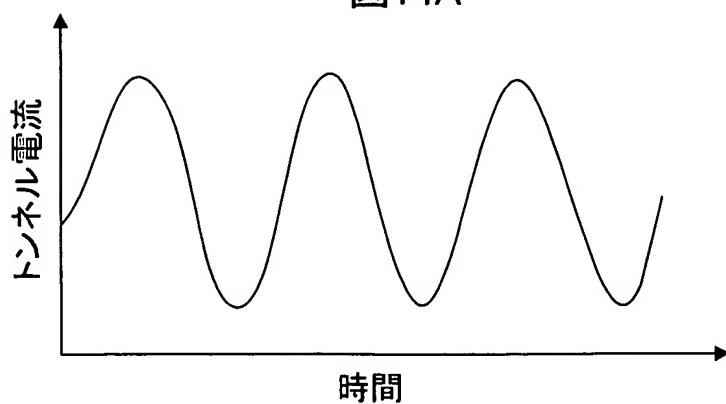
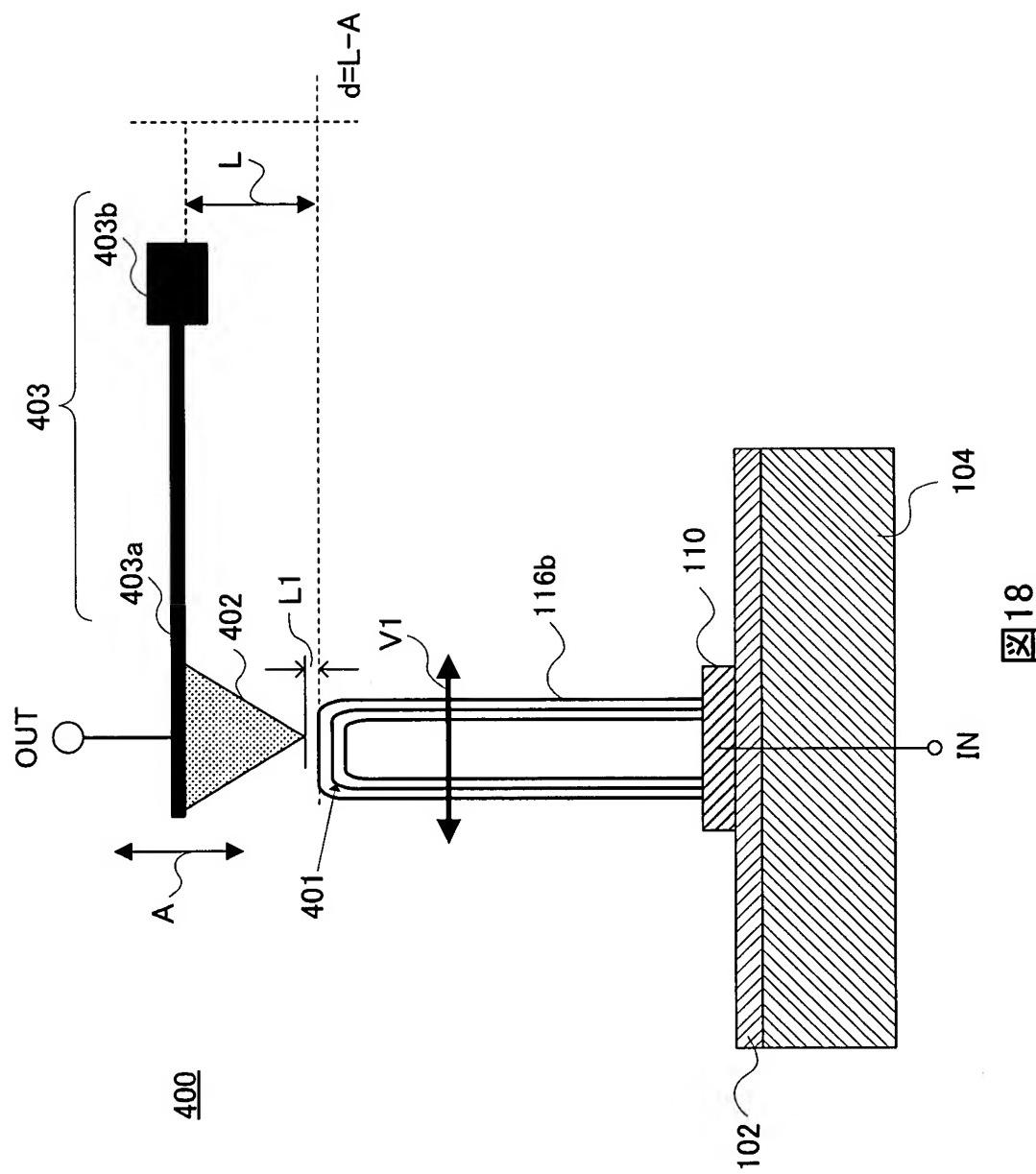


図14B



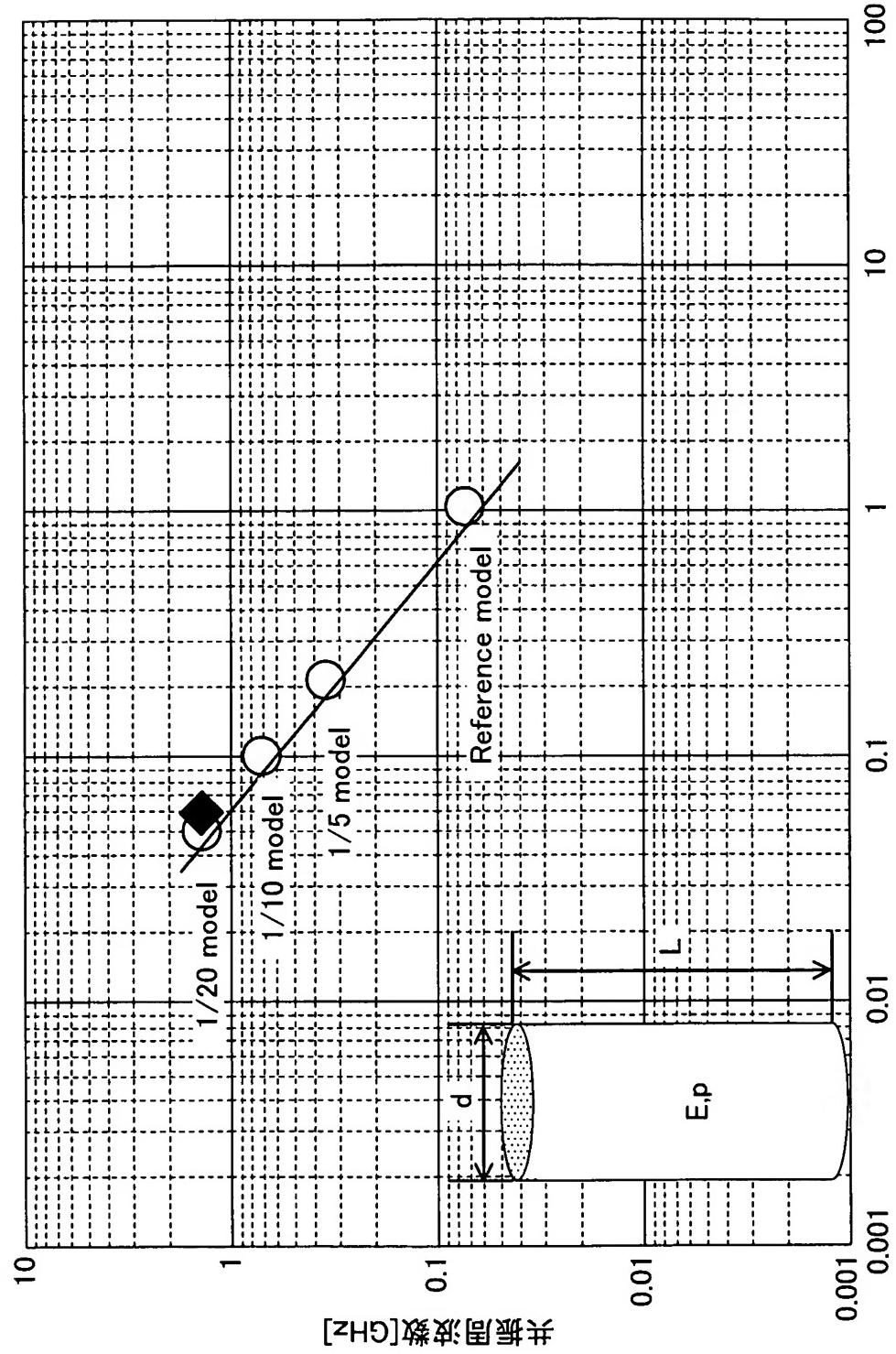


図19

20/20

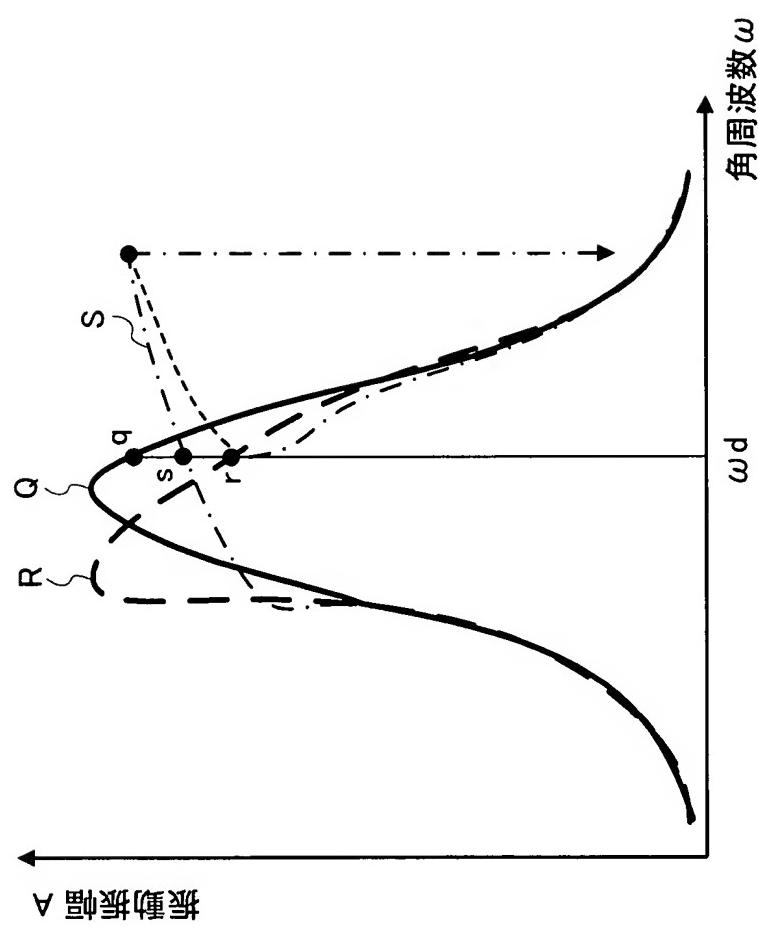


図20